

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Andro Puče

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Andro Puče

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i kvalitetnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentici dr.sc. Maji Jurici na pomoći i velikom strpljenju tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se gдинu. Marku Lugoviću i gдинu. Ivanu Baranoviću iz tvrtke ZM-Vikom na ustupljanju uzoraka za eksperimentalni rad te na savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se osoblju Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava na pomoći pri ispitivanju uzoraka te osoblju Laboratorija za materijalografiju na pomoći pri izradi makroizbrusaka.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije na pomoći za pripremanje uzoraka.

Posebno se zahvaljujem obitelji i djevojci na podršci i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada.

Andro Puče



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: ANDRO PUČE Mat. br.: 0035182833

Naslov rada na hrvatskom jeziku: OPTIMIZACIJA PARAMETARA BRADAVIČASTOG ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA SKLOPA ŽICA-CIJEV

Naslov rada na engleskom jeziku: OPTIMIZATION OF PARAMETERS IN RESISTANCE PROJECTION WELDING OF WIRE-TUBE ASSEMBLY

Opis zadatka:

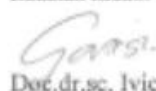
Opisati postupke elektrootpornog zavarivanja i definirati osnovne parametre kao i njihov utjecaj na kvalitetu spoja. Dati detaljan prikaz mogućnosti bradavičastog zavarivanja, opisati potrebnu opremu i dati primjer primjene u industrijskoj praksi. Analizirati zavarljivost materijala postupcima elektrootpornog zavarivanja i izdvojiti moguće probleme te posebno izdvojiti materijale koji se koriste za izradu elektroda za zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za proizvod baziran na sklopu žica-cijev uz odgovarajući plan eksperimenta predložiti raspon seta parametara te provesti probno zavarivanje. Odabirom odgovarajućih ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-12 odrediti optimalnu kombinaciju parametara uzimajući u obzir maksimalnu proizvodnost, ali i minimalna potrebna mehanička svojstva. U konačnici dati zaključke o predloženoj tehnologiji i dobivenim parametrima zavarivanja pri proizvodnji u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadan:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić


Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS JEDNADŽBI	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. OSNOVNI PRINCIPI I PODJELA POSTUPAKA ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA.....	2
2.1. Vrste postupaka elektrootpornog zavarivanja	4
2.1.1. Točkasto zavarivanje.....	4
2.1.2. Bradavičasto zavarivanje.....	4
2.1.3. Šavno zavarivanje	6
2.1.4. Sučeljeno zavarivanje.....	7
3. PARAMETRI I ZNAČAJKE ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA.....	9
3.1. Jakost struje	10
3.1.1. Režimi rada	12
3.1.2. Vrste struja	12
3.2. Vrijeme zavarivanja	18
3.3. Sila na elektrode	19
3.4. Oblik elektroda.....	21
3.5. Izbor materijala elektrode.....	23
3.6. Ostali parametri	25
4. GEOMETRIJA ZAVARA	28
5. ZAVARLJIVOST MATERIJALA POSTUPCIMA ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA.....	29
5.1. Zavarljivost ugljičnih čelika postupcima elektrootpornog zavarivanja	30
6. GREŠKE KOD ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA	32
7. ISPITIVANJE ELEKTROOTPORNO ZAVARENIH SPOJEVA.....	36
8. EMISIONE ELEKTRODE	39
8.1. Materijal i elementi emisionih elektroda.....	41

9. EKSPERIMENTALNI RAD	43
9.1. Cilj eksperimentalnog rada.....	43
9.1. Zavarivanje uzoraka	44
9.2. Ispitivanje uzoraka	50
9.2.1. Priprema uzoraka.....	50
9.2.2. Vizualni pregled	51
9.2.3. Kontrola savijanjem	55
9.2.4. Smična proba.....	56
9.2.5. Proba čupanja	58
9.2.6. Analiza makroizbrusaka	63
9.2.7. Ispitivanje tvrdoće	69
9.3. Razrada rezultata ispitivanja	75
9.3.1. Utjecaj novih parametara na proizvodnost.....	75
9.3.2. Prijedlog daljnjeg istraživanja	77
10. ZAKLJUČAK	78
11. LITERATURA.....	80

POPIS SLIKA

Slika 1. Bradavičasto zavarivanje konstrukcijske žice za potrebe građevine [3].....	1
Slika 2. Otpori pri elektrootpornom zavarivanju [4].....	2
Slika 3. Proces točkastog zavarivanja [4].....	4
Slika 4. Neki od karakterističnih tipova izbočina [10].....	5
Slika 5. Tok struje kroz elektrode i bradavice [1]	5
Slika 6. Šavno zavarivanje [4].....	7
Slika 7. Sučeljeno zavarivanje [11].....	8
Slika 8. Tipičan dijagram jakosti struje, vremena te sile pritiska kod elektrootpornog zavarivanja [4].....	10
Slika 9. Transformator za elektrootporno zavarivanje [12]	10
Slika 10. Dijagram ovisnosti jakosti struje i vremena zavarivanja kod točkastog zavarivanja [1]	11
Slika 11. Vrste struja za elektrootporno zavarivanje [1]:.....	13
Slika 12. Razlika u strukturama: a) izmjeničnog i b) istosmjernog izvora struje [13].....	13
Slika 13. Zavarivanje s konstantnom strujom [1]	14
Slika 14. Zavarivanje s naknadnim zagrijavanjem [1]	15
Slika 15. Zavarivanje s predgrijavanjem [1]	15
Slika 16. Impulsno zavarivanje [1]	16
Slika 17. Zavarivanje sa strujom zagrijavanja [1]	16
Slika 18. Zavarivanje sa strujom hlađenja [1].....	16
Slika 19. Segmenti vremenskog ciklusa pri EO zavarivanju [2].....	18
Slika 20. Djelovanje sile elektrode pri elektrootpornom zavarivanju [13]	19
Slika 21. a) zavarivanje s konstantnom silom elektrode, b) zavarivanje s promjenljivom silom elektrode [1]	21
Slika 22. Elektrode za bradavičasto zavarivanje [19]	22
Slika 23. Razni oblici elektroda za točkasto zavarivanje [4]	23
Slika 24. Geometrija zavora [4,6].....	28
Slika 25. Površinska pukotina i šupljine u jezgri zavora [24]	33
Slika 26. Prevelika penetracija [24]	34
Slika 27. Prskanje metala [25].....	34
Slika 28. Nesimetričnost spoja [4]	35
Slika 29. Uzorak za smično ispitivanje [27]	36
Slika 30. Ispitivanje čupanjem (ljuštenjem) [4]	37
Slika 31. Princip rada emisionih elektroda [28].....	39
Slika 32. Montaža emisionih elektroda [19]	40
Slika 33. Elektro-precipitacijski filter [28]	40
Slika 34. Presjek sklopa žica-cijev	41
Slika 35. Emisiona elektroda [19]	42
Slika 36. Postupak izrade žice provlačenjem [31]	42
Slika 37. Trenutak neposredno prije zavarivanja sklopa žica-cijev [19]	44
Slika 38. Dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za P2, test 1, test 2 i test 3	46
Slika 39. Dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za P3, test 4, test 5 i test 6	47

Slika 40. Stroj za bradavičasto elektrootporno zavarivanje sklopa žica-cijev [19]	48
Slika 41. Dio šablone za postavljanje žica i cijevi [19]	49
Slika 42. Uzorci spremni za rezanje i daljnju pripremu [19]	50
Slika 43. Priprema uzoraka rezanjem na tračnoj pili [19].....	51
Slika 44. Svi uzorci pripremljeni za ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-12:2007 [19]	51
Slika 45. Kontrola savijanjem [19]	55
Slika 46. a) pucanje žice u ZUT-u uzorka test 4, b) pucanje žice u zavaru uzorka test 2 [19]	56
Slika 47. Uzorak pripremljen za smičnu probu [19]	56
Slika 48. Ispitivanje uzorka smičnom probom [19]	57
Slika 49. Rezultati ispitivanja smične probe	58
Slika 50. Uzorak pripremljen za mehaniziranu probu čupanja [19].....	59
Slika 51. Ispitivanje probom čupanja [19]	60
Slika 52. Ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa i jakosti struje za P2, test 1, test 2 i test 3.....	61
Slika 53. ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa te jakosti struje za P3, test 4, test 5 i test 6.....	62
Slika 54. Dimenzije srednjih promjera zavora te omjeri maksimalnih i minimalnih promjera zavora za sve uzorke.....	63
Slika 55. Makroizbrusak uzorka test 4 [19]	64
Slika 56. Pozicije na makroizbrusku sklopa žica-cijev za mjerenje tvrdoće [19].....	70
Slika 57. Vrijednosti tvrdoća za uzorke P2, test 1, test 2 i test 3	73
Slika 58. Vrijednosti tvrdoća za uzorke P3, test 4, test 5 i test 6	73
Slika 59. Usporedba vremena zavarivanja i proizvodnje za uzorke P3 i test 4.....	76

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav i mehanička svojstva elektroda za elektrootporno zavarivanje [21]	25
Tablica 2. Ocjene zavarljivosti raznih metala [1].....	29
Tablica 3. Ukupna vremena zavarivanja uzoraka u odnosu na uzorke P2 i P3.....	43
Tablica 4. Parametri zavarivanja uzoraka	45
Tablica 5. Vizualna kontrola uzoraka test 1, test 2 i test 3.....	52
Tablica 6. Vizualna kontrola uzoraka test 4, test 5 i test 6.....	53
Tablica 7. Rezultati ispitivanja smične probe	57
Tablica 8. Rezultati ispitivanja probe čupanjem	60
Tablica 9. Rezultati mjerenja dimenzija zavara nakon probe čupanja	61
Tablica 10. Geometrijska analiza makroizbrusaka uzoraka P2, test 1, test 2 i test 3.....	65
Tablica 11. Geometrijska analiza makroizbrusaka uzoraka P3, test 4, test 5 i test 6.....	67
Tablica 12. Geometrijske značajke uzoraka.....	69
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorke P2, test 1, test 2 i test 3	71
Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorke P3, test 4, test 5 i test 6.....	72

POPIS JEDNADŽBI

	Jednadžba	Opis
(1)	$Q = \int_0^t I^2(t)R(t)dt$	Unos topline pri elektrootpornom zavarivanju
(2)	$d = 5\sqrt{s}$	Širina koluta elektrode kod šavnog zavarivanja
(3)	$d_e = 2 \cdot s + 2,5,$	Radius vrha elektrode u ovisnosti o debljini zavarivanog materijala

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	J	Unos topline
I	A	Jakost struje zavarivanja
R	Ω	Električni otpor
R ₁	Ω	Otpor materijala gornje elektrode
R ₂	Ω	Otpor materijala donje elektrode
R ₃	Ω	Kontaktni otpor između radnog komada i gornje elektrode
R ₄	Ω	Kontaktni otpor između radnog komada i donje elektrode
R ₅	Ω	Kontaktni otpor između dvaju radnih komada
R ₆	Ω	Vlastiti omski otpor volumena materijala
R ₇	Ω	Vlastiti omski otpor volumena materijala
t	s	Vrijeme zavarivanja
d	mm	Širina koluta elektrode
s	mm	Debljina materijala
F _{el}	N	Sila na elektrode
d _e	mm	Promjer vrha elektrode
h	mm	Dubina otiska elektrode
I _ž	A	Jakost struje žarenja
I _p	A	Jakost struje predgrijavanja
d _j	mm	Promjer jezgre zavara
t _p	mm	Penetracija
x	mm	Razmak između limova
D _{ZUT}	mm	Promjer ZUT-a
D _C	mm	Promjer zone difuzije
d ₂	mm	Maksimalni promjer jezgre zavara
d ₁	mm	Minimalni promjer jezgre zavara
R _e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća

D_b	mm	Promjer materijala prije provlačenja
D_a	mm	Promjer materijala nakon provlačenja
σ_a	N/mm^2	Naprezanje u materijalu nakon provlačenja
σ_b	N/mm^2	Naprezanje u materijalu prije provlačenja
F_s	N	Smična sila
$F_{\check{c}}$	N	Sila čupanja
d_s	mm	Srednji promjer jezgre zavora
EO		Elektrotopno zavarivanje
AC		Izmjenična struja
DC		Istosmjerna struja
ZUT		Zona utjecaja topline
AWS		Američko društvo za zavarivanje
JR		Udarni rad loma od 27 J pri 20 °C
JRH		Udarni rad loma od 27 J pri 20 °C za šuplji profil
OM		Osnovni materijal
MZ		Metal zavora

SAŽETAK

U radu je opisan postupak elektrootpornog zavarivanja s naglaskom na bradavičasto zavarivanje. Opisane su značajke elektrootpornog zavarivanja kao što su parametri zavarivanja, geometrija elektroda, materijal elektroda i drugo. Opisane su i pogreške koje su mogu pojaviti te način ispitivanja zavara. U eksperimentalnom dijelu, koji je izveden u tvrtci ZM-Vikom te u Laboratoriju za Zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, zavareno je osam sklopova žica-cijev te je svaki od sklopova zavaren sa različitim parametrima. Žice su bile podijeljene u dvije vrste, s višom i s nižom vrijednosti vlačne čvrstoće. Cilj je bio povećati proizvodnost sklopova žica-cijev te optimirati parametre zavarivanja, odnosno pronaći odgovarajuće zajedničke parametre za sklopove s obe vrste žica. Nakon zavarivanja, izvedena su različita ispitivanja mehaničkih svojstava te su analizirani rezultati.

Ključne riječi: elektrootporno bradavičasto zavarivanje, sklop žica-cijev, parametri zavarivanja, proizvodnost, mehanička svojstva

SUMMARY

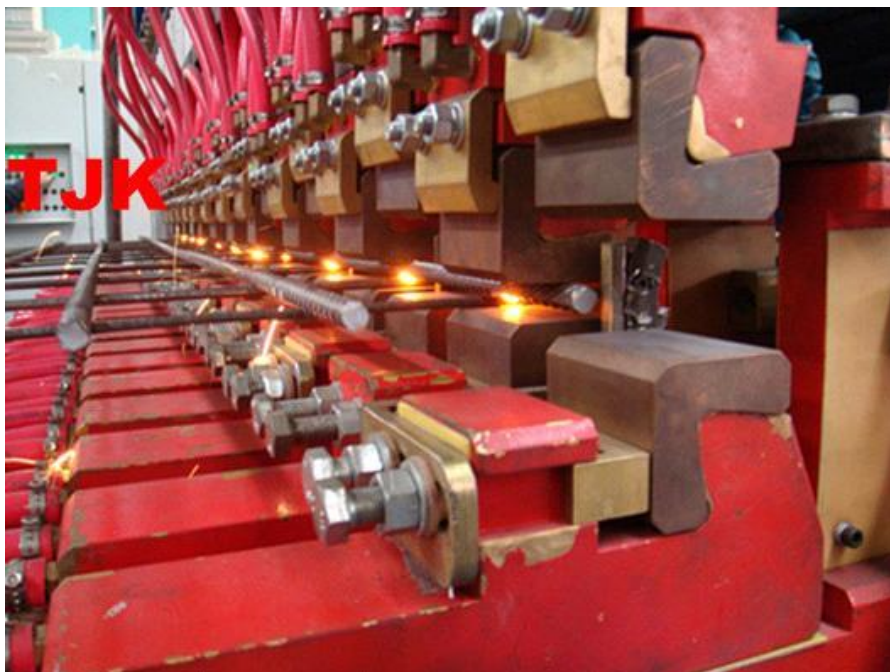
The paper described the procedure for resistance welding with an emphasis on the projection welding. It described features of resistance welding, such as welding parameters, electrode geometry, the electrode material and more. It described the errors that can occur and the method of testing welds. In the experimental section, which was performed in the company ZM-Vikom and the Laboratory for Welded structures of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, eight wire – tube assemblies were welded and each with different parameters. Wires were divided into two species, with a higher and with a lower tensile strength. The aim was to increase productivity of assemblies wire - pipe and to optimize welding parameters and to find suitable common parameters for using both types of wires. After welding, different mechanical tests were performed and the results were analyzed.

Key words: resistance projection welding, wire-tube assembly, welding parameters, productivity, mechanical properties

1. UVOD

Elektrootporno zavarivanje jedno je od najstarijih i najčešće korištenih postupaka zavarivanja u industriji. Područje primjene veoma je široko, od aviona i svemirskih letjelica do automobila i minijaturnih elektroničkih elemenata [1,2]. O važnosti poznavanja tematike elektrootpornog zavarivanja govore i činjenice da, primjerice, jedan automobil ima i nekoliko tisuća zavarenih točaka, a jedan avion i do milijun točaka.

Kod elektrootpornog zavarivanja koristi se pojava da se svaki vodič zagrijava kada kroz njega protječe električna struja, razmjerno električnom otporu kojim se vodič opire prolasku struje. Ta toplina koristi se za zagrijavanje određene količine materijala, na temperaturu zavarivanja, uz istodobnu primjenu mehaničke energije u vidu sile pritiska između elektroda [1]. Na slici 1 prikazan je jedan od brojnih elektrootpornih postupaka zavarivanja, tzv. bradavičasto zavarivanje.



Slika 1. Bradavičasto zavarivanje konstrukcijske žice za potrebe građevine [3]

2. OSNOVNI PRINCIPI I PODJELA POSTUPAKA ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA

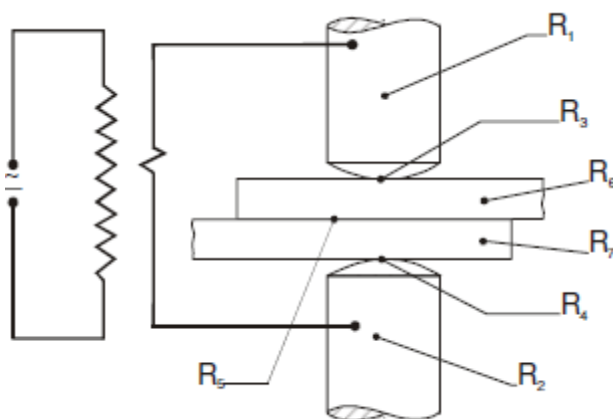
Postupci elektrootpornog zavarivanja specifični su po tome da se ne koristi dodatni materijal kao kod većine ostalih postupaka zavarivanja. Kod elektrootpornih postupaka zavarivanja metal se zagrijava i tali toplinom stvorenom uslijed prolaska električne struje [1,2,4]. U takvom procesu iskorištena je pojava da se svaki vodič zagrijava kada kroz njega protječe električna struja, razmjerno električnom otporu kojim se taj vodič opire prolasku struje. Stvaranjem topline prolaskom struje, uz istovremenu primjenu mehaničke energije u vidu sile pritiska između elektroda, ostvaruje se zavareni spoj. Vrijeme koje je potrebno za ostvarivanje zavarenog spoja, ovisi o debljini i tipu materijala koji se zavaruje, količini struje koja protječe te o poprečnom presjeku kontaktne površine elektroda [4].

Količina topline razvijene u vodiču, kroz koji u određenom vremenskom intervalu protječe električna struja iznosi prema Jouleovom zakonu:

$$Q = \int_0^t I^2(t)R(t)dt \quad (1)$$

gdje su: I - električna struja, R - električni otpor te t - vrijeme zavarivanja [1].

Važno je shvatiti važnost utjecaja otpora pri elektrootpornom zavarivanju. Otpor je zapravo zbroj otpora koji se javljaju između elemenata koji čine sustav elektrootpornog zavarivanja. Ti otpori prikazani su na slici 2.



Slika 2. Otpori pri elektrootpornom zavarivanju [4]

Sa slike 2 je vidljivo da je otpor R_1 otpor materijala gornje elektrode, R_2 je otpor materijala donje elektrode, R_3 je kontaktni otpor između radnog komada i gornje elektrode, R_4 je kontaktni otpor između radnog komada i donje elektrode, R_5 je kontaktni otpor između dvaju radnih komada dok su R_6 i R_7 vlastiti omski otpori volumena materijala i čine ih dijelovi svakog od limova čije su baze aproksimativno jednake površinama vrhova elektroda. Važno je da kontaktni otpori između radnih komada budu što veći, a kontaktni otpori između komada i elektroda što manji tako da se elektrode što manje zagrijavaju. Kontaktni otpori se javljaju zbog nehomogenosti površina elektroda te radnih komada te struja teče samo kroz mikroispupčenja na tim površinama koje se dodiruju. Međutim, ako se te površine optereće nekom određenom silom F , doći će do spljoštenja tih površina i smanjenja otpora. Na otpore dodatno utječu i metalurške karakteristike materijala elektroda i radnih komada.

Jakosti struje koje se koriste kod elektrootpornog zavarivanja kreću se od nekoliko stotina do nekoliko stotina tisuća ampera, uz male napone. Uz jako kratka vremena zavarivanja, postupci elektrootpornog zavarivanja su relativno neopasni za čovjeka, uz iznimke kao što je prskanje kapljica [1,2].

EO (elektrootporno zavarivanje) zavarivanje je zahvaljujući niskim troškovima i visokoj učinkovitosti superiornije ostalim postupcima zavarivanja u vidu zavarivanja tankih metalnih limova [4,5]. Lako se automatizira i pogodno je za velike serije, odnosno masovnu proizvodnju. Također je pogodno i za manje serije jer se radi o fleksibilnoj tehnologiji i jednostavnoj opremi čiji se radni parametri daju lako podešavati i kontrolirati. Velika pogodnost EO zavarivanja je mogućnost zavarivanja velikog broja metalnih materijala [4].

Najšire primjenjivani postupci elektrootpornog zavarivanja su slijedeći [1,2,6]:

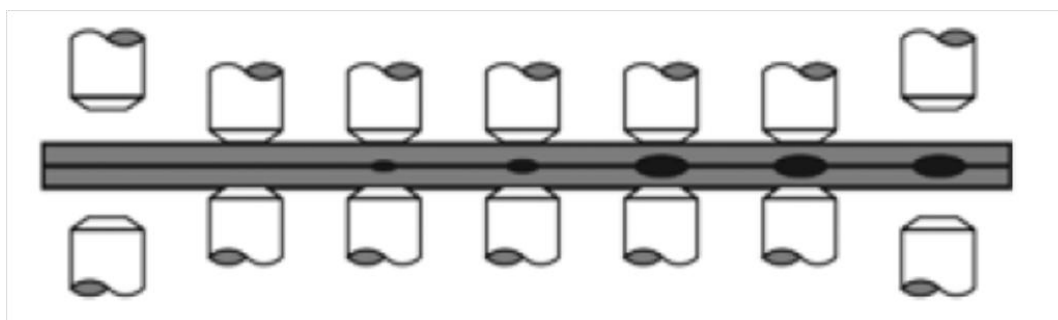
- točkasto,
- bradavičasto,
- šavno (kolutno) i
- sučeljeno zavarivanje.

Od tih postupaka, najčešće se koristi točkasto zavarivanje [4]. U ovom radu najviše riječi će biti o bradavičastom zavarivanju.

2.1. Vrste postupaka elektrootpornog zavarivanja

2.1.1. Točkasto zavarivanje

Kod točkastog zavarivanja toplina se razvija uslijed otpora proticanja struje na dodirnim površinama radnih komada koji su pritisnuti elektrodama. Može biti jedнотоčkasto i višetočkasto zavarivanje. Najviše primjenjivan slučaj točkastog zavarivanja je jedнотоčkasto dvostrano zavarivanje pri kojem se struja dovodi s obe strane radnih komada [1]. Na slici 3 prikazan je jedan takav proces.



Slika 3. Proces točkastog zavarivanja [4]

Elektrode koje pritišću radne komade su vođeno hlađene i moraju osigurati kvalitetan kontakt između radnih komada, odnosno elektrode silom pritiska moraju ukloniti oksidne filmove i slične nečistoće s površine komada [7]. Postupak oblikovanja točkasto zavarenog spoja prilično je složen i komplicirano je dobiti optimalan odnos između parametara zavarivanja da se dobije željeni spoj. Poznato je da je u autoindustriji teško dobiti kontinuitet kvalitete zavarenih spojeva [8]. Dovoljna je mala promjena jednog parametra da se dobije neispravan zavar, npr. pojavi se nečistoća na elektrodama ili se komadi krivo pomaknu. Potrebno je uspostaviti određene intervale u kojima će se parametri kretati da bi se uvijek ostvarivao kvalitetan spoj.

Za postizanje kvalitetnog točkasto zavarenog spoja potrebno je uspostaviti optimalni odnos između jakosti struje zavarivanja te vremena prolaska struje, sile pritiska elektroda te njene vremenske promjene, dimenzija i oblika vrha elektroda [1].

2.1.2. Bradavičasto zavarivanje

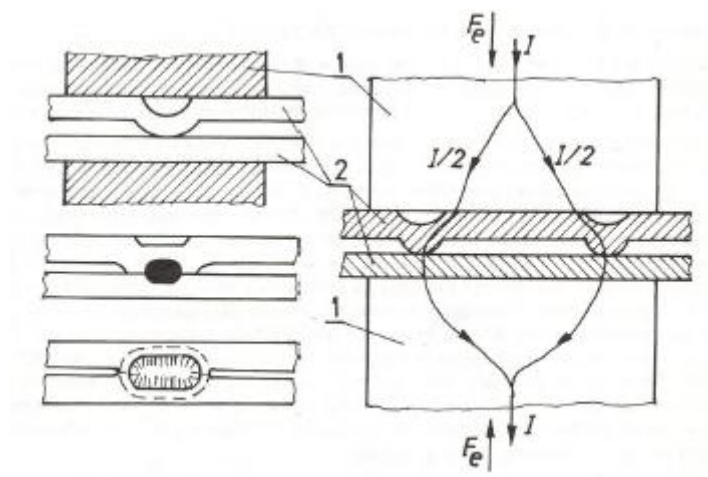
Bradavičasto zavarivanje predstavlja postupak zavarivanja kod kojega se radni komadi zavaruju u više točaka istodobno. Lokaliziranje topline i sile pritiska elektroda izvedeno je

tako da je jedan od komada oblikovan s izbočinama (bradavicama) [1]. Kod takvog zavarivanja obično dolazi do velike deformacije, odnosno spljoštavanja izbočina na radnom komadu [8]. Zbog velikog kontaktnog otpora na mjestu dodira razvije se dovoljno topline da se mjesto kontakta zagrije i rastali te je oblikovani spoj sličan onome kod točkastog zavarivanja. Moguće je zavarivati preklapajuće i sučeljene spojeve. Često se zavaruju predmeti različitih debljina [9]. Na slici 4 prikazani su neki od karakterističnih tipova izbočina.



Slika 4. Neki od karakterističnih tipova izbočina [10]

Kod bradavičastog zavarivanja elektrode su obično velikih površina (veće nego kod točkastog zavarivanja). Jedan ili oba komada ima na sebi formirane bradavice koje predstavljaju vodiče električne energije s jednog na drugi radni komad. Slika 5 prikazuje tok struje zavarivanja kroz elektrode i bradavice na radnom komadu. Kod bradavičastog zavarivanja kontaktna površina između bradavice i radnog komada je mala te je kontaktni otpor iz tog razloga veći nego kod primjerice, točkastog zavarivanja.



Slika 5. Tok struje kroz elektrode i bradavice [1]

Jako je važan oblik i veličina izbočina. Uz to je važna sila pritiska te brzina kojom se ostvaruje [9]. Ako je sila prevelika te prebrzo naraste do te veličine, izbočine će se deformirati i prije nego počne taljenje izazvano otporom struje koja protječe te vjerojatno neće ni doći do

pojave zavora odnosno rastaljene jezgre u zoni kontakta. U drugom slučaju, ako je struja prevelika te se sila pritiska presporo aplicira, također neće doći do pojave zavora, odnosno može doći do propaljivanja komada s izbočinom [9].

Neke od prednosti bradavičastog zavarivanja u odnosu na točkasto su [1,4]:

- duži vijek trajanja elektroda,
- mogućnost korištenja manjeg razmaka između zavarenih točaka,
- povećana produktivnost zbog istodobnog zavarivanja više točaka, odnosno postupak je energetski i ekonomski učinkovitiji,
- bolji estetski dojam zavarenog spoja,
- mogućnost zavarivanja dijelova koje bi bilo teško zavariti postupkom točkastog zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja sa širokim intervalom parametara zahvaljujući lokaliziranju struje pri vrhu izbočine prije samog stvaranja taline u spoju,
- manja osjetljivost zavarenog spoja na pripremu površine elemenata koji se zavaruju ,
- kontaktna površina se manje grije radi male gustoće struje (na velikoj površini).

2.1.3. Šavno zavarivanje

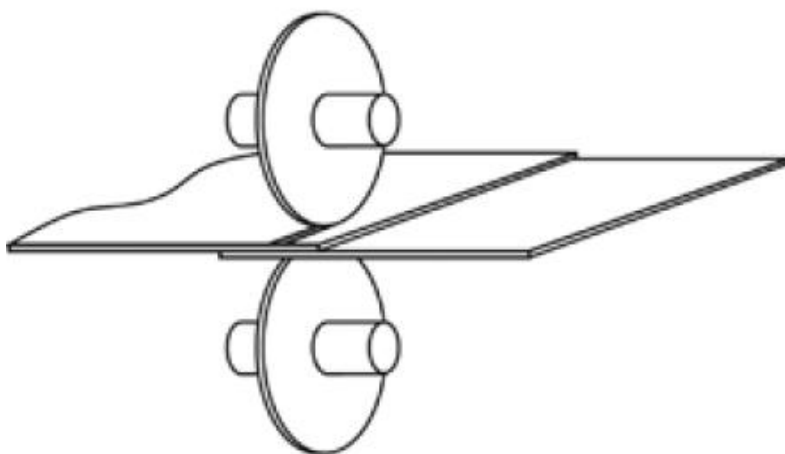
Šavno zavarivanje slično je točkastom zavarivanju, čak se može reći da je to kontinuirano točkasto zavarivanje. Naime, elektrode su u obliku diska i rotacijom stvaraju zavarene točke koje se međusobno preklapaju [1]. Kada se na elektrodama uspostavi određeni napon, struja prolazi kroz radne komade i to kroz trenutno mjesto dodira i kroz već zavarene točke. Kako je kontaktni otpor između limova velik, određeni volumen metala oko točke trenutnog dodira počne se zagrijavati i taliti. Točke se kontinuirano zavaruju u nizu te im se razmak može mijenjati. Razmak između pojedinih točaka ovisi o brzini zavarivanja i o vremenskom intervalu impulsa struje koja se propušta kroz elektrode te kroz radne komade [1].

Kod šavnog zavarivanja, zavar je obično 20 % uži od koluta elektrode [4]. Kontaktna površina koluta elektrode može biti ravna i konveksna. Kod ravne površine, širina koluta obično se odredi prema sljedećoj formuli:

$$d = 5\sqrt{s}, \quad (2)$$

gdje je s debljina radnog komada [4].

U usporedbi s točkastim zavarivanjem, kod šavnog zavarivanja koriste se veće jakosti struje te kraća vremena zavarivanja za limove iste debljine. Jakost struje je najčešće u intervalu od 10 kA do 30 kA [4]. Brzina zavarivanja smanjuje se s povećanjem debljine radnih komada. Na slici 6 prikazan je princip šavnog zavarivanja s dva diska, odnosno koluta elektroda.



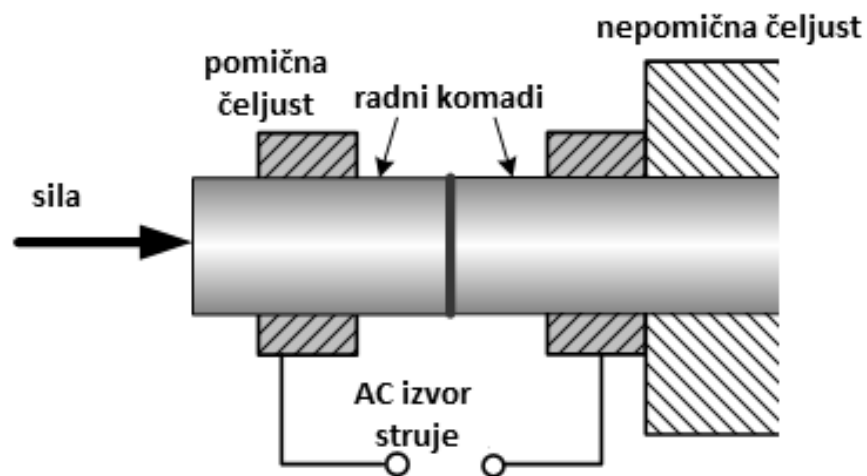
Slika 6. Šavno zavarivanje [4]

2.1.4. Sučeljeno zavarivanje

Sučeljeno zavarivanje je postupak kojim se najčešće zavaruju deblji metalni limovi te šipkasti materijal. Radni komadi se stežu čeljustima (elektrodama) i njihovim se dodiranjem zatvori sekundarni krug struje te se uslijed kontaktnog otpora krajevi počnu zagrijavati i taliti. Naposljetku se pod djelovanjem sile pritiska krajevi sabiju i nastane zavareni spoj [1,8].

Sučeljeno zavarivanje može biti zavarivanje čistim otporom i zavarivanje iskrenjem [1]. Zavarivanje iskrenjem je malo složeniji proces jer se sastoji od predgrijavanja kod kojeg se primicanjem i odmicanjem čeljusti stvaraju kratki spojevi i zbog kontaktnog otpora, krajevi radnih komada se zagrijavaju. Kada su krajevi odnosno sučeljene površine radnih komada dovoljno zagrijane, međusobno se približavaju, protječe velika struja zavarivanja te nastaje taljenje materijala uz koje se javlja i električni luk [1]. Zavarivanje čistim otporom je klasično sučeljeno zavarivanje i predstavlja prvi otkriveni postupak elektrotopnog zavarivanja [1]. Dijelovi koji se zavaruju stežu se čeljustima koje su smještene na pločama od kojih je jedna pokretna. Obje ploče vezane su za krajeve sekundarnog dijela transformatora za zavarivanje. Između čeonih površina radnih komada uspostavi se lagani dodir djelovanjem sile čime se zatvori sekundarni krug transformatora. Nakon toga uspostavi se tok električne struje pri

čemu se krajevi radnih komada zagrijevaju na određenu temperaturu i uslijed djelovanje sile sabijaju te nastaje zavareni spoj. Na slici 7 prikazano je sučeljeno zavarivanje čistim otporom.



Slika 7. Sučeljeno zavarivanje [11]

3. PARAMETRI I ZNAČAJKE ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA

Za postizanje kvalitetnog zavara elektrootpornim zavarivanjem, potrebno je podesiti čitav niz parametara koji su međusobno ovisni. Promjena jednog od njih može izazvati promjenu više drugih parametara.

Najvažniji parametri kod elektrootpornog zavarivanja su [1,2,4]:

- jakost struje,
- vrijeme zavarivanja,
- sila pritiska,
- geometrija odnosno oblik elektrode,
- izbor materijala elektrode.

Ostali parametri koji utječu na kvalitetu zavara su [1,4]:

- debljina radnih komada i njihov oblik (geometrija),
- električni otpor materijala radnih komada,
- toplinska vodljivost materijala,
- stanje kontaktne površine komada (nečistoće, razni oksidi, hrapavost),
- mehanička i metalurška svojstva materijala,
- kemijski sastav,
- vrijeme držanja sile pritiska,
- moguće toplinske obrade prije i nakon zavarivanja,
- oblik strujnih impulsa.

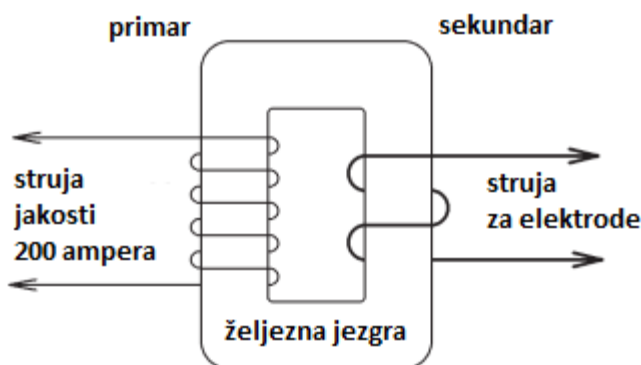
Na slici 8 prikazan je jedan tipični dijagram gdje se vidi odnos jakosti struje, vremena zavarivanja i sile pritiska.



Slika 8. Tipičan dijagram jakosti struje, vremena te sile pritiska kod elektrootpornog zavarivanja [4]

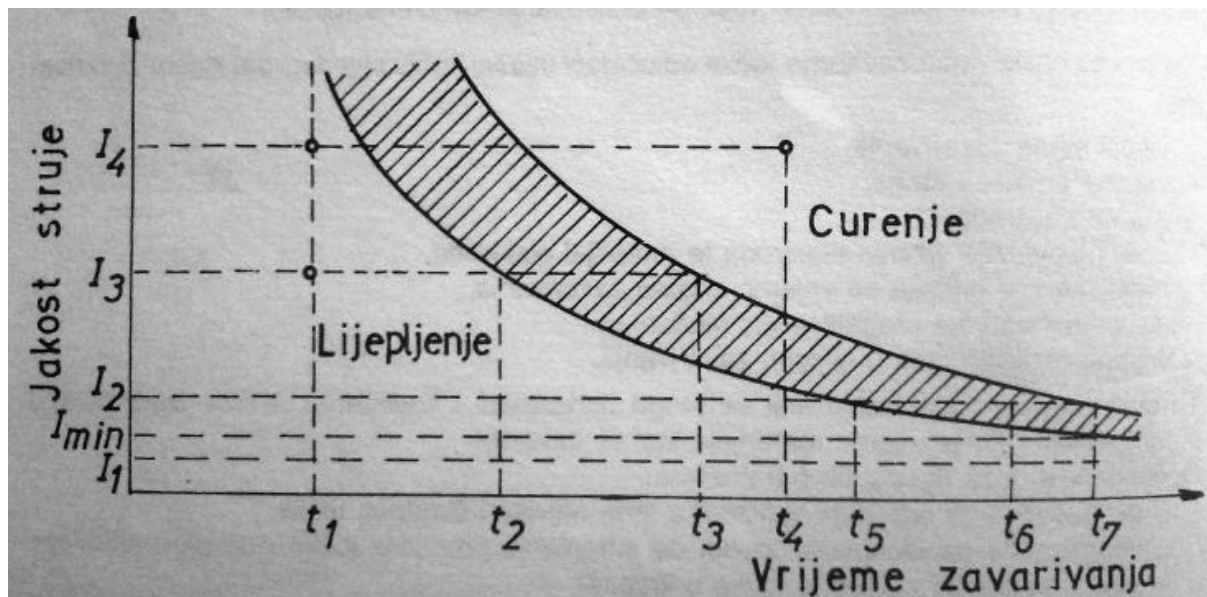
3.1. Jakost struje

Jakost struje zavarivanja je jedan od najvažnijih parametara pošto o njoj najviše ovisi unos topline u radni komad tijekom samog procesa. Varira od nekoliko stotina do nekoliko stotina tisuća ampera. Uobičajeno se za zavarivanje niskougličnih čelika, debljine 1,6 mm, koristi oko 10 kA ili 10000 A [12]. Da bi se dobila tolika velika struja, potrebno je imati zavarivački transformator koji će primjerice, 200 ampera pretvoriti u 10000 ampera. Na slici 9 prikazan je princip rada jednog takvog uređaja. Transformator se u principu sastoji od 2 namota žice, primara i sekundara, koji su položeni oko željezne jezgre. Faktor pomoću kojeg se iznos napona/jakosti struje povećava ili smanjuje je omjer namotaja žice na primaru i sekundaru.



Slika 9. Transformator za elektrootporno zavarivanje [12]

Za unos topline potrebno je djelovati na 2 parametra, jakost struje i vrijeme. Prevelika jakost struje može dovesti do štrcanja te propaljivanja radnog komada. S druge strane, nedovoljno visoka jakost struje dovodi do slabog taljenja i nedostatka zavora. Kod točkastog zavarivanja, za određene kombinacije karakteristika materijala, njegove debljine, geometrije elektroda te sile pritiska postoje dijagrami gdje je označeno područje zavarivanja. Svako odstupanje izvan osjenčanog područja rezultira nekvalitetnim zavarom, odnosno lijepljenjem ili curenjem [1]. Na slici 10 prikazan je jedan takav dijagram.



Slika 10. Dijagram ovisnosti jakosti struje i vremena zavarivanja kod točkastog zavarivanja [1]

Zavarivanje može biti ostvareno za sve kombinacije jakosti struje i vremena u zasjenjenom području. Za bradavičasto zavarivanje osjenčano područje bi trebalo biti veće pošto je zavarivanje moguće u širem intervalu parametara.

Jakost struje ima veliki utjecaj na značajke zavora. Mali porast struje dovodi do značajnog povećanja promjera zavora, veće penetracije te porasta čvrstoće zavora [4]. Na većini strojeva za elektrootporno zavarivanje jakost struje se podešava kao postotak nominalne jakosti struje stroja.

Da bi se održavala odgovarajuća jakost struje te dobivali kvalitetni zavori, potrebno je pripaziti na neke faktore koji mogu utjecati na promjenu struje. Jedan od takvih faktora je "skretanje" (šentiranje) struje koja protječe. Radi se o fenomenu kad struja prilikom zavarivanja skreće prema prethodnom zavoru što direktno utječe na unos topline u trenutno

mjesto zavora [13]. Sljedeći faktori su trošenje elektroda, oštećenja na kablovima te varijacije u naponu [13].

3.1.1. Režimi rada

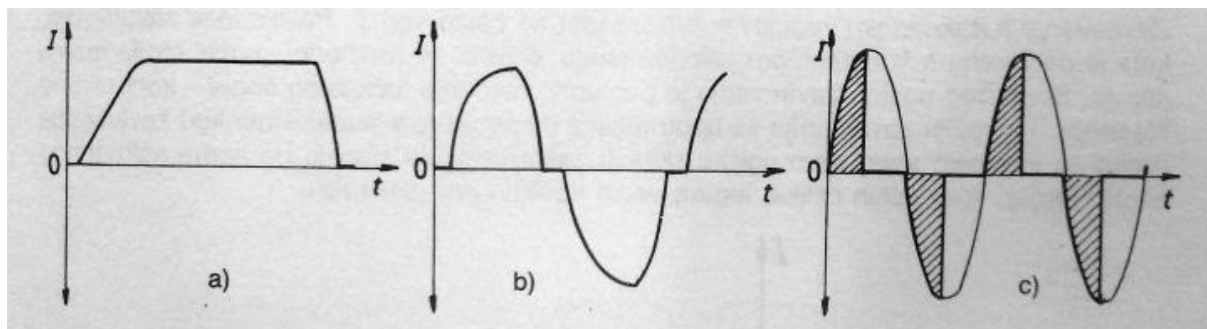
Postoje 2 režima rada, oštri (kratki) te meki (dugi) režim rada. Na dijagramu na slici 10 vidljivo je da je za veće vrijednosti jakosti struje potrebno kraće vrijeme zavarivanja. Takav način zavarivanja je oštri režim koji donosi niz prednosti. Manje se topline gubi oko područja zavora, odnosno toplinski gubici su manji [4]. Za određene materijale, poput aluminija i bakra te njihovih legura, oštri režim rada je neophodan [1]. Kod oštrog režima rada također je manja deformacija materijala te je naposljetku i zavar kvalitetniji.

Pri dugom (mekom) režimu rada, dolazi do zagrijavanja većeg područja oko zavora nego kod oštrog režima te su i toplinski gubici veći. Također je i deformacija materijala veća i to znatno [1]. Elektrode mogu ostaviti dubok otisak u radnom komadu što često nije prihvatljivo iz estetskih razloga. Povećana je i potrošnja elektroda. Kod mekog režima rada vrijeme hlađenja je produljeno. To može biti korisno kod nekih materijala koji imaju tendenciju pretjeranog otvrdnjavanja [4].

3.1.2. Vrste struja

Kod elektrootpornog zavarivanja koriste se izmjenična i istosmjerna struja te nije svejedno koja se koristi. Izmjenična struja može biti niskofrekventna te s izrezanom fazom. Na slici 11 prikazane su vrste struja za elektrootporno zavarivanje. Izmjenična struja ima najjednostavniju strukturu izvora te je ekonomski najprihvatljivija [13]. Nedostaci takve struje su način hlađenja jezgre zavora te pauze koje se javljaju pri prebacivanju polova [13].

Strojevi za zavarivanje s izmjeničnom strujom najčešće rade s frekvencijom od 50 Hz. Sekundarna struja (kod struje s izrezanom fazom) ima izrazitije vrhove i dobiva se nepotpuni oblik sinusoide. Kod niskofrekventne struje javlja se ustaljeno povećanje struje do neke konstantne vrijednosti, slično kao kod istosmjerne struje. U pauzama struje dolazi do prebacivanja polova za naredno povećanje struje [1]. Pri zavarivanju s izmjeničnom strujom dolazi do zagrijavanja mjesta zavarivanja i naknadno se formira leća. Konačnu veličinu brzo dostiže do završetka samog procesa zavarivanja.



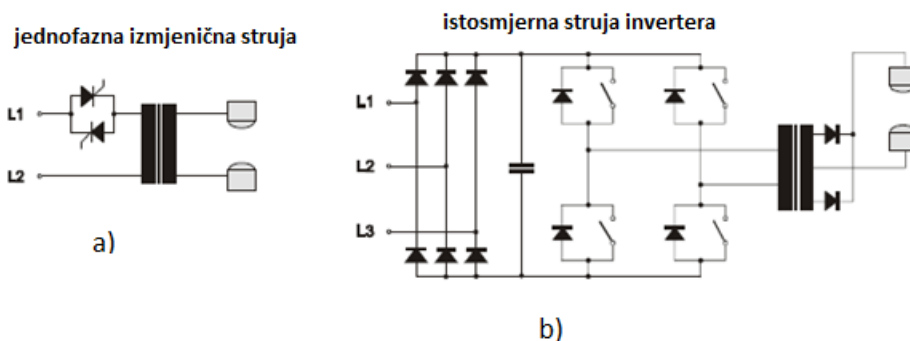
Slika 11. Vrste struja za elektrootporno zavarivanje [1]:

a) istosmjerna, b) niskofrekventna, c) s izrezanom fazom

3.1.2.1. Istosmjerna struja

Pri zavarivanju s istosmjernom strujom struja se od nule postupno povećava dok ne postigne određenu vrijednost koja se potom održava za podešeno vrijeme zavarivanja. Istodobno sa zagrijavanjem mjesta zavora, stvara se i leća koja svoju konačnu veličinu dostiže na kraju vremena zavarivanja. Sličan efekt se javlja kod izmjenične niskofrekventne struje, osim što se tamo leća dobiva određenim brojem impulsa struje.

Općenito je komplicirano (u prošlosti daleko više) postići visoke vrijednosti istosmjerne struje pri niskom naponu, a pogotovo upravljati takvim strujama [14]. Zato se češće koriste strojevi s izmjeničnom strujom dok se istosmjerna struja koristi za specijalne namjene. Strojevi istosmjerne struje su također strukturalno kompliciraniji i skuplji [13]. Na slici 12 prikazana je razlika u strukturama jednog jednofaznog izmjeničnog izvora struje te istosmjernog inverterskog izvora.

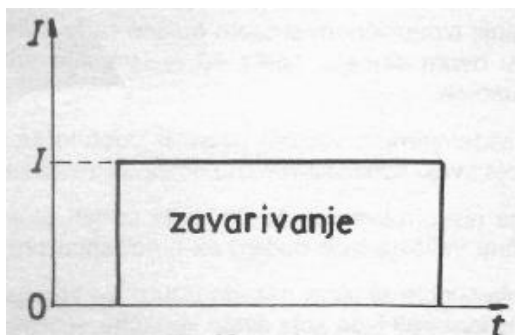


Slika 12. Razlika u strukturama: a) izmjeničnog i b) istosmjernog izvora struje [13]

Kod zavarivanja s istosmjernom strujom utvrđeni su manji gubici u sekundarnom krugu [14]. Moguće je postići više vrijednosti jakosti struje te kraća vremena zavarivanja. Također je poboljšana kontrola parametara (invertna tehnika), odnosno moguće ih je finije podešavati u odnosu na zavarivanje izmjeničnom strujom [13]. Nekim eksperimentima utvrđeno je i da je moguće dobiti pravilnije, odnosno jednoličnije oblike jezgri u zavarima [15]. Dodatne prednosti utvrđene zavarivanjem istosmjernom strujom su niski unos topline te visoka produktivnost. Nedostatak je, kao što je već spomenuto, podešavanje vrijednosti jakosti struje [13].

Važno je spomenuti određene specifičnosti istosmjerne struje, odnosno vremenske konstante vezane za te pojave. Naime, kod istosmjerne struje jakost struje ne postiže odmah određenu vrijednost koja će se održavati tijekom procesa zavarivanja, već postupno raste od nule (radi induktiviteta). Vrijeme koje je potrebno da struja naraste do te vrijednosti, često se naziva vremenska konstanta kruga, a može se dobiti pomoću omjera induktiviteta L i otpora R [16]. Postupna promjena jakosti struje vrijedi i za smanjivanje na nulu, pri gašenju stroja. Te vremenske konstante treba uzeti u obzir pri podešavanju vremena zavarivanja [16].

Kod zavarivanja s istosmjernom strujom moguće je koristiti različite oblike struje. Primjerice, zavarivanje s konstantnom strujom, zavarivanje s naknadnim zagrijavanjem, itd. Zavarivanje s konstantnom strujom se često koristi kod zavarivanja niskougljičnih čelika. Jakost struje je konstantna za cijelo vrijeme trajanja zagrijavanja [1]. Slično tome je i zavarivanje s naknadnim zagrijavanjem koje služi za postupno hlađenje zavarenog komada. Koristi se za čelike koji su skloni zakaljivanju i to tako da se nakon zavarivanja dovodi naknadni impuls struje manje jakosti. Na slikama 13 i 14 prikazani su dijagrami struje i vremena za te tipove istosmjernog zavarivanja.

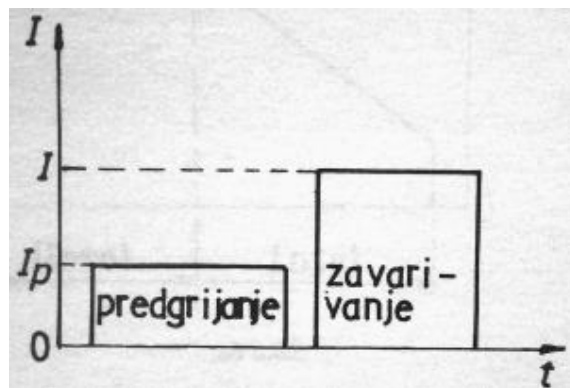


Slika 13. Zavarivanje s konstantnom strujom [1]



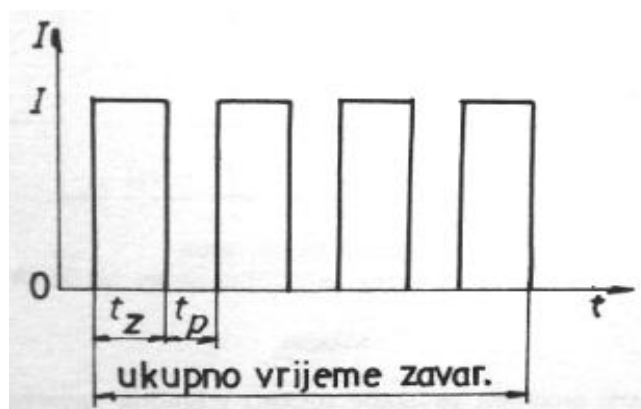
Slika 14. Zavarivanje s naknadnim zagrijavanjem [1]

Moguće je i zavarivanje s predgrijavanjem. Dovodi se struja male jakosti te se na mjestu zavarivanja ostvaruje temperatura niža od temperature taljenja. To je potrebno radi lakšeg zbližavanja komada koji imaju određenu krutost. Tim efektom također se umanjuje učinak zakaljivanja određenih čelika. Slika 15 prikazuje dijagram struje i vremena za takav proces.



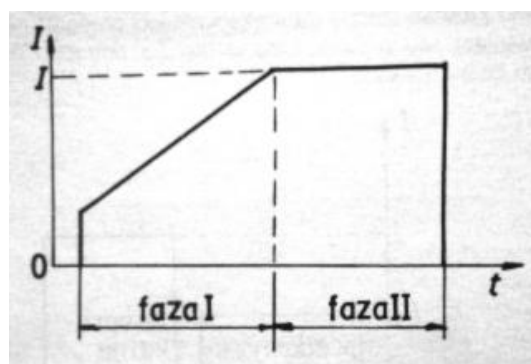
Slika 15. Zavarivanje s predgrijavanjem [1]

Sljedeći tip zavarivanja istosmjernom strujom je impulsno zavarivanje. Sastoji se od perioda zagrijavanja i prekida zagrijavanja. Tokom cjelokupnog vremena izmjenjivanja ovih perioda, elektrode ostaju u kontaktu s limovima. Apsorbirana toplina na mjestu kontakta odvodi se hlađenjem elektroda. Takav postupak pogodan je za limove veće debljine. Koriste se jakosti struje i sile pritiska umjerenih vrijednosti. Dijagram procesa vidljiv je na slici 16.

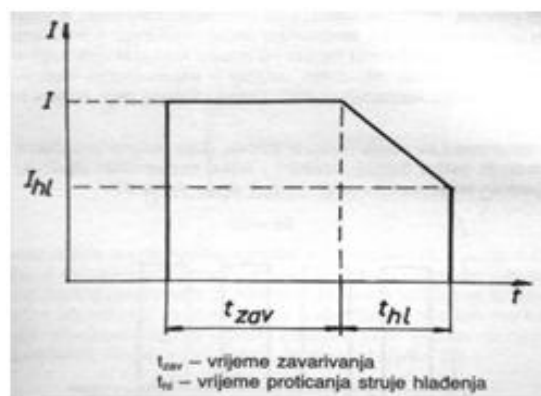


Slika 16. Impulsno zavarivanje [1]

Dodatna dva tipa zavarivanja s istosmjernom strujom su zavarivanje sa strujom zagrijavanja i zavarivanje sa strujom hlađenja i njihovi dijagrami su prikazani na slikama 17 i 18. Kod zavarivanja sa strujom zagrijavanja ishod je sličan kao i kod zavarivanja s predgrijavanjem. Koristi se kod zavarivanja legura lakih metala. Zavarivanje sa strujom hlađenja koristi se kod aluminija i njegovih legura pošto aluminij brzo prelazi iz krutog u tekuće stanje. Takvim zavarivanjem smanjuje se brzina hlađenja.



Slika 17. Zavarivanje sa strujom zagrijavanja [1]



Slika 18. Zavarivanje sa strujom hlađenja [1]

3.1.2.2. Izmjenična struja

Elektrootporno zavarivanje izmjeničnom strujom može biti, kako je prikazano na slici 11 pod b i c, niskofrekventno te s izrezanom fazom. Kod takvog načina zavarivanja, struja najčešće ima oblik sinusoide ili nepotpuni oblik sinusoide, ako se radi o zavarivanju s izrezanom fazom [1].

Strojevi za elektrootporno zavarivanje koji zavaruju s izmjeničnom strujom imaju najjednostavniju strukturu, kako je prikazano na slici 12, a također je takva vrsta struje troškovno najisplativija, međutim, nedostatak takve struje je hlađenje jezgre zavara (u usporedbi sa istosmjernom strujom) [13]. Radi stalnog izmjena polariteta te dostizanja vrlo visokih jakosti struja, pojačano je i trošenje elektroda.

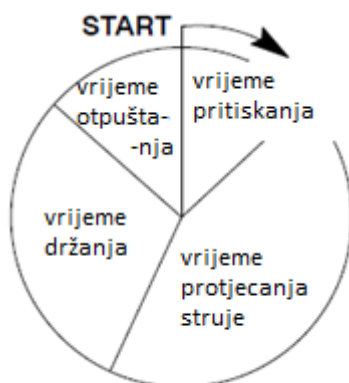
3.2. Vrijeme zavarivanja

Kod elektrootpornog zavarivanja vremena su jako kratka. Mjerna jedinica za vrijeme zavarivanja je perioda koja iznosi 0,02 sekunde (zavarivanje s frekvencijom od 50 Hz). Uz jakost struje i silu pritiska, radi se o najvažnijem parametru kod elektrootpornog zavarivanja. Unos topline direktno ovisi o vremenu zavarivanja te jakosti struje i ta dva parametra su neposredno vezana međusobno. Kod elektrootpornog zavarivanja najčešće se radi o jako malim trajanjima zavarivanja, npr. nekoliko perioda. To pogotovo vrijedi za oštre režime zavarivanja.

Porast vremena zavarivanja donosi neke negativne stavke poput pojačanog trošenja elektroda te veće deformacije radnih komada [4]. Također, toplina se širi na šire područje oko zavora, odnosno dolazi do porasta ZUT-a i zavar se sporije hladi što i nije uvijek negativna stavka, pogotovo kod metala sklonih pretjeranom otvrdnjavanju, odnosno očvršćivanju [2].

Već su spomenute vremenske konstante zbog kojih se kod, primjerice istosmjernje struje, određena jakost struje ne postiže odmah, nego postupno. To svakako treba uzeti u obzir pri odabiru i podešavanju vremena zavarivanja. Također je potrebno uzeti u obzir i otpor materijala radnih komada koji se zavaruju te silu pritiska. Svi ti parametri u korelaciji s vremenom pridonose unosu topline. Kod zavarivanja ugljičnih čelika, važan faktor je i sadržaj ugljika. Povećani sadržaj ugljika zahtijeva dulja vremena zavarivanja [4].

Vrijeme zavarivanja nije samo vrijeme dok struja protječe, već se radi o ukupnom vremenu zavarivanja. U to su uključena vremena pritiskanja elektroda, protjecanja struje, držanja te otpuštanja elektroda. Na slici 19 prikazane su sve stavke koje čine vrijeme zavarivanja.

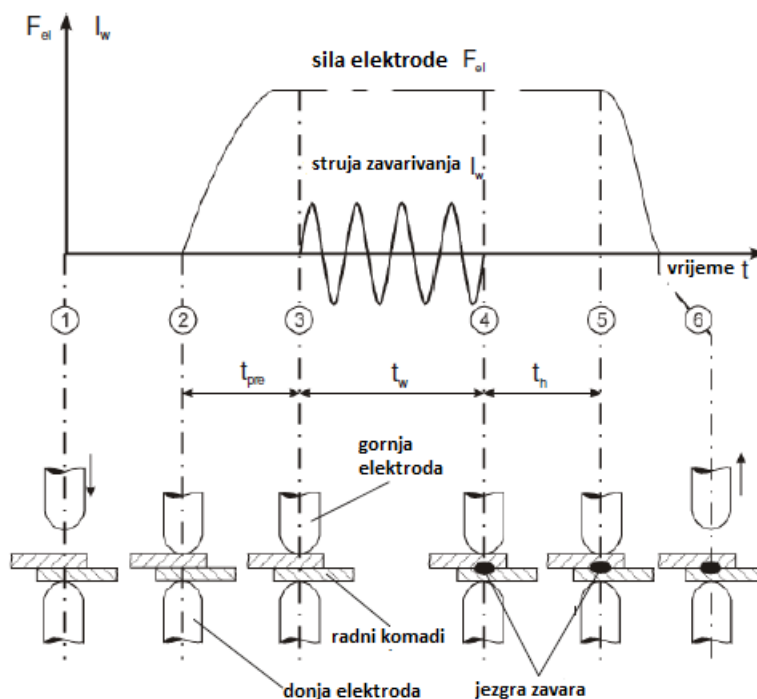


Slika 19. Segmenti vremenskog ciklusa pri EO zavarivanju [2]

Vrijeme pritiskanja elektroda mjeri se od trenutka kad se elektrode počnu približavati radnim komadima. Vrijeme protjecanja struje je vrijeme koje se mjeri u periodama i sastoji se od vremena dok struja ne postigne traženu vrijednost te vremena pri traženom iznosu jakosti struje. Vrijeme držanja je kad struja prestane teći, međutim elektrode još istom silom pritišću radne komade i zavar se hladi. Vrijeme držanja trebalo bi biti dulje što su radni komadi deblji i što su uvjeti zbližavanja lošiji. Vrijeme otpuštanja vrijeme koje teče dok elektrode prestaju pritiskati i udaljavaju se prema idućem mjestu zavara [2].

3.3. Sila na elektrode

Djelovanje sile pritiska, odnosno sile elektrode ispoljava se u tri faze nastanka zavarenog spoja. Preciznije govoreći, za vrijeme zbližavanja, zavarivanja i zadržavanja. Potrebno je izabrati optimalne vrijednosti sile elektrode za ta vremena. Sila na elektrode mora biti dovoljno velika da se dobije određena dodirna kontaktna površina između limova, samim tim i najpogodniji kontaktni otpor između radnih komada [1,13]. Otpor između elektroda i komada i trebao bi biti što manji. Na slici 20 prikazano je djelovanje sile elektrode tijekom zavarivanja, odnosno njena promjena u odnosu na promjenu jakosti struje.



Slika 20. Djelovanje sile elektrode pri elektrootpornom zavarivanju [13]

Jako je važno razumjeti relacije između sile elektrode, kontaktnog otpora te stanja površina elektroda i radnih komada. Sila elektrode i otpor su obrnuto proporcionalni. Površine elektrode i radnih komada su pune brazdi i nepravilnosti, odnosno ispupčenja, a pogotovo ako se radi o dotrajalim elektrodama te ako površine nisu dobro očišćene. Veće vrijednosti sile pritiska rezultirat će s većim kontaktom, odnosno više će se nepravilnosti na površini spljoštiti te će struja lakše proteći s elektrode na radni komad [2]. To znači da je i otpor manji.

Mala sila pritiska poželjna je pri početku zavarivanja kako bi se olakšalo početno zagrijavanje (osigura se dovoljno velik kontaktni otpor između limova) [1]. U takvim uvjetima otpor između elektrode i komada također je velik. To je uzrok trošenja i deformacije elektroda. Posljedica toga je ograničenje sile elektrode na neku minimalnu vrijednost gdje će se zadovoljiti uvjeti (otpor između limova što veći, a otpor između elektrode i lima što manji).

Odgovarajućom silom elektrode može se spriječiti štrcanje. To se provodi tako da se poveća sila elektrode u trenutku početka stvaranja rastaljene jezgre zavara, odnosno kad kontaktni otpor padne na nulu [1,17]. Premala vrijednost sile elektrode rezultirat će štrcanjem i prskanjem iz zavara, dok će previsoka vrijednost previše deformirati limove te smanjiti otpor [13].

Sila elektrode najviše ovisi:

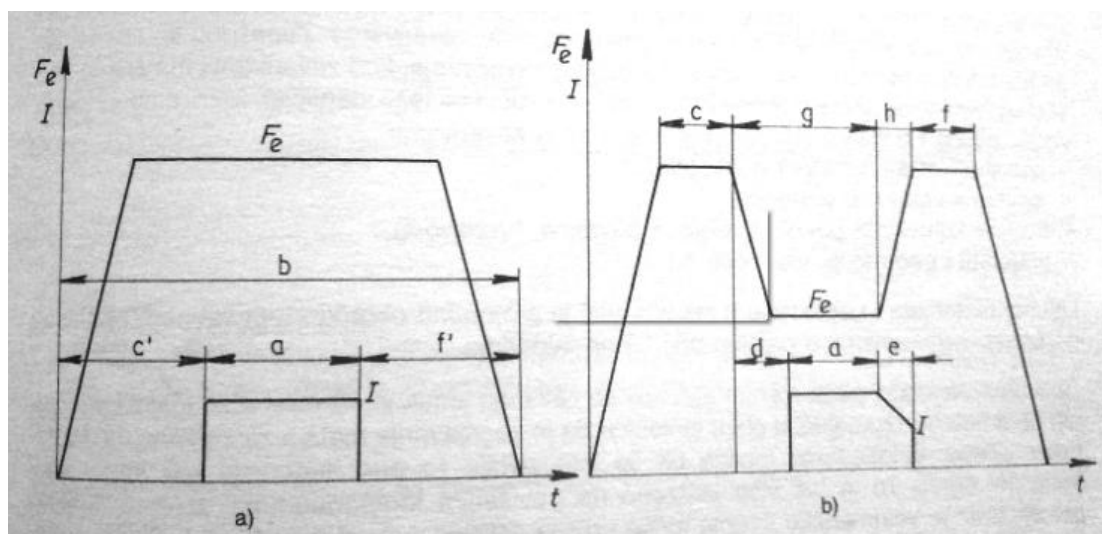
- o električnim i mehaničkim karakteristikama materijala koji se zavaruje,
- o kontaktnom otporu koji je funkcija stanja površina elemenata koji se zavaruju,
- o debljini i geometriji elemenata koji se zavaruju,
- o jakosti struje te njenoj gustoći.

Što je veća gustoća struje zavarivanja, potrebna je i veća specifična sila elektrode. Inače može doći do curenja i štrcanja rastaljenog metala [1,2].

Da bi se održala odgovarajuća sila elektrode tijekom zavarivanja, potrebno je održavati sustav (pneumatski, hidraulični, itd.) koji je odgovoran za nastajanje sile. Svaka nepravilnost u sustavu može dovesti do promjene vrijednosti sile što može poremetiti i ostale parametre i rezultirati nekvalitetnim zavarima [13].

Sila elektrode tijekom zavarivanja može biti konstantna te se može i mijenjati. U prvom slučaju sila je konstantna u svim fazama zavarivanja. U drugom slučaju, odnosno kod zavarivanja s promjenjivom silom elektrode dolazi do naglog povećanja sile pri kraju

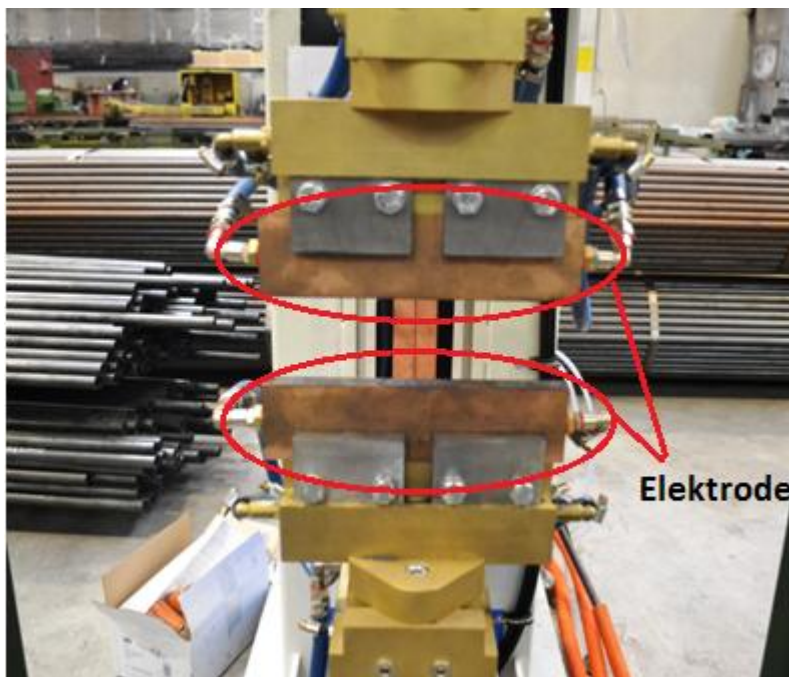
zavarivanja [1]. Tim postupkom znatno se poboljšava kvaliteta zavora, u vidu poboljšanja mehaničkih i metalurških svojstava. Promjena se odvija u trenu ili kroz nekoliko perioda prije prekidanja struje zavarivanja. Takva sila naziva se sila kovanja [1]. Prednost se očituje u prilagođavanju sile elektrode različitim fazama elektrootpornog zavarivanja i to se koristi kad je zahtijevana visoka kvaliteta zavarenih točaka. Sila elektrode utječe na formiranje rasporeda temperaturnih polja pri zavarivanju, na kristalizaciju metala te na proces taljenja i otvrdnjavanja zavarenog spoja. Slika 21 prikazuje razliku između zavarivanja s konstantnom i promjenjivom silom elektrode.



Slika 21. a) zavarivanje s konstantnom silom elektrode, b) zavarivanje s promjenjivom silom elektrode [1]

3.4. Oblik elektroda

Oblik elektrode, odnosno oblik vrha elektrode ima veliki utjecaj na kvalitetu zavarenih spojeva kod elektrootpornog zavarivanja. Direktno utječe na formiranje rastaljene jezgre te na završni izgled zavora [18]. To pogotovo vrijedi za točkasto i šavno zavarivanje, dok u manjoj mjeri vrijedi za bradavičasto zavarivanje. Kod bradavičastog zavarivanja najčešće se koriste elektrode velike i ravne površine. Primjer takvih elektroda prikazan je na slici 22.



Slika 22. Elektrode za bradavičasto zavarivanje [19]

Vrh elektrode može biti ravan ili zaobljen, a za pojedine slučajeve izrađuju se specijalni oblici. Kod upotrebe ravnog vrha elektrode važno je postići da radni komad bude paralelan s površinom vrha elektrode. Kod takvih elektroda promjer zavarene točke može dostići veličinu otiska vrha elektrode. Kod elektroda sa zaobljenim vrhom promjer zavarene točke uvijek je manji od otiska vrha elektrode. Bitno je spomenuti ovisnost radijusa zaobljenja vrha elektrode kod zavarivanja komada različite debljine. Radi koncentracije struje, za deblji lim koriste se manji radijusi dok se za tanje limove koriste veći radijusi [1].

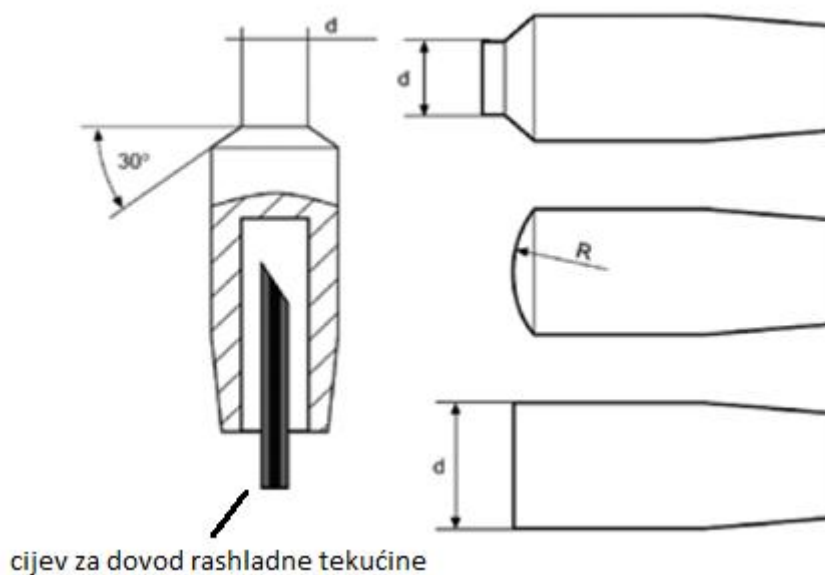
Svaka promjena vrha elektrode zahtijeva i promjenu ostalih parametara zavarivanja, primjerice jakosti struje. Isto tako, promjena debljine komada koji se zavaruje zahtijeva promjenu radijusa vrha. Primjerice, AWS (American Welding Society) preporuča formulu za promjer radijusa:

$$d_e = 2 \cdot s + 2,5, \quad (3)$$

gdje je s debljina materijala koji se zavaruje [1].

Kod geometrije vrha elektrode važan je i kut koji zatvara vrh i ravnina radnog komada. Pokazalo se da elektrode s vrhovima čiji je kut po vrijednosti bliže iznosu od 90° jednoličnije raspoređuju tok struje odnosno unos topline je ujednačeniji pri većem broju zavora [20]. Isti autori utvrdili su da takva geometrija elektroda pozitivno utječe na trošenje elektroda,

odnosno elektrode se manje troše te je moguć širi interval podešavanja jakosti struje [20]. Na slici 23 prikazani su neki oblici elektroda koji se često koriste pri točkastom zavarivanju.



Slika 23. Razni oblici elektroda za točkasto zavarivanje [4]

Općenito, geometrija elektrode mora biti optimizirana tako da elektroda ne bude mehanički i termalno preopterećena tijekom zavarivanja [20]. Također je potrebno posvetiti pažnju na održavanje geometrije i stanja elektrode. Površina vrha elektrode s vremenom će se deformirati i povećati te tako utjecati na lokaliziranje struje i unos topline u zavar. To se posebno očituje kod točkastog zavarivanja dok je bradavičasto zavarivanje zahvalnije po tom pitanju. Kod bradavičastog zavarivanja idealno bi bilo brusnim papirom i poliranjem održavati površinu vrha elektrode dok je kod točkastog zavarivanja preporučljivo tokarenje elektrode [1].

3.5. Izbor materijala elektrode

Elektrode su dio sekundarnog strujnog kruga stroja i kao takve su jedan od najvažnijih dijelova. Jedna od najvažnijih stavki prije zavarivanja je izbor materijala elektroda. Princip elektrootpornog zavarivanja je da materijal pruža otpor prolasku struje i stvara se toplina. Različiti metali imaju različita metalurška svojstva, samim tim i drugačiji otpor. Trajnost elektroda, kvaliteta zavara i proizvodnost u procesu zavarivanju ovise o pravilnom izboru materijala elektrode.

Materijal elektrode i materijal dijelova koji se zavaruju trebaju imati različitu toplinsku i električnu vodljivost [16]. U principu, koeficijenti toplinske i električne vodljivosti kod materijala elektrode moraju biti viši od osnovnog materijala. Elektrode se izrađuju od materijala koji jako dobro provode električnu struju i stvaraju minimalni otpor protjecanju iste te istodobno imaju dovoljno visoku čvrstoću i tvrdoću kako se ne bi deformirale uslijed sile pritiska[1]. Nedovoljna toplinska i električna vodljivost legure od koje je izrađena elektroda izazvat će povećano zagrijavanje i trošenje radne površine elektroda. Materijal izrade je najčešće bakar, odnosno legure bakra. U posebnim slučajevima mogu se koristiti i drugi materijali.

Neki od zahtjeva koji elektrode moraju ispuniti pri radu su [13]:

- dobra električna provodljivost,
- dobra toplinska provodljivost (utječe i na hlađenje radnih komada),
- dobra otpornost na visoke temperature,
- dobra mehanička svojstva pri visokim temperaturama,
- niska tendencija legiranju s radnim komadima.

Sve te uvjete moguće je zadovoljiti pravilnim izborom materijala elektrode. Ako se zavaruje metal koji pruža veliki otpor protjecanju struje, potrebno je izabrati elektrode koje pružaju minimalni otpor i obrnuto. Ako se zavaruje metal koji jako dobro provodi struju, valja izabrati elektrode koje pružaju velik otpor [5]. Dakle, materijali elektrode i komada koji se zavaruju trebaju imati različitu toplinsku i električnu vodljivost. Primjerice, kod zavarivanja čeličnih limova, najbolja svojstva imaju elektrode izrađene od legure bakra i kroma [1]. U tablici 1 prikazani su kemijski sastav i mehanička svojstva elektroda za tip 1 i tip 2 grupe A prema ISO 5182.

Tablica 1. Kemijski sastav i mehanička svojstva elektroda za elektrootporno zavarivanje [21]

Grupa	Tip	Broj	Oznaka	Legirajući elementi, %	Stanje, mm	Tvrdća, HV 30	Električna provodljivost		Temperatura omekšavanja °C min.
							MS/m min.	% IACS	
A	1	1	Cu-ETP	Cu(+Al) min. 99,90	provlačeno ≥ 25	86	56	96	150
					provlačeno < 25	90	56	96	
					kovano	50	56	96	
					lijevano	40	50	85	
		3	CuAgO, 1P	Ag 0,08-0,15	provlačeno < 25	90	55	95	150
		4	Cu-PHC	P 0,003	provlačeno	40	56	96	150
	2	1	CuCr1	Cr 0,3-1,2	provlačeno ≥ 25	125	44	76	475
					provlačeno < 25	140	44	76	
					kovano	100	44	76	
					lijevano	85	44	76	
		2	CuCr1Zr	Cr 0,5-1,4 Zr 0,02-0,2	provlačeno ≥ 25	130	43	74	500
					provlačeno < 25	140	43	74	
					kovano	100	43	74	
		3	CuCrZr	Zr 0,4-1,0 Zr 0,02-0,15	otvrdnuto	150	43	74	500
					brušeno < 45	150	43	74	
		4	CuZr	Zr 0,11-0,25	provlačeno	140	47	81	500
					brušeno < 30	130	47	81	

3.6. Ostali parametri

Važniji parametri koji su opisani, nisu dostatni za konstantno kvalitetno izvođenje zavora. Stručnjaci su uočili da pri konstantno podešenim parametrima zavarivanja, kod zavarivanja jako sličnog kemijskog sastava, formiranje zavarenog spoja ne teče identično. Treba voditi računa i o stavkama kao što su [1,4,13]:

- toplinska obrada (usko vezana s jakosti struje),
- specifični električni otpor materijala,
- toplinska vodljivost,
- kvaliteta kontaktnih površina elektroda i radnih komada,

- okolina izvora struje te dostupnost mjesta zavora,
- razmak između susjednih zavarenih mjesta,
- stanje izvora struje i opreme.

Toplinska obrada kod elektrootpornog zavarivanja usko je vezana za podešavanje jakosti struje i njenim promjenama tijekom postupka zavarivanja. Komade koji se zavaruju moguće je predgrijavati i naknadno ih hladiti. To se postiže podešavanjem jakosti struje gdje se, primjerice, za predgrijavanje, koristi jakost struje niža od one s kojom se zavaruje. S tim se olakšava zavarivanje određenih metala ili se postižu određena mehanička svojstva. Slična analogija vrijedi i za naknadno hlađenje komada gdje se komadi postupno hlade nakon završetka zavarivanja kako se ne bi brzo ohladili i naglo otvrdnuli.

Specifični električni otpor materijala koji se zavaruju bitan je faktor koji utječe na vrijednost jakosti struje s kojom će se zavarivati [5]. Materijali s višim otporom oslobađat će više topline dok struja protječe kroz njih i obrnuto. Za materijale s malim otporom (poput bakra), potrebne su veće vrijednosti jakosti struje kako bi se postigao željeni unos topline. Specifični toplinski otpor određenog materijala može se izračunati prema raznim empirijskim izrazima te njegove vrijednosti za isti materijal mogu varirati [1].

Toplinska vodljivost materijala mijenja se s promjenom temperature u materijalu. S porastom temperature ona opada [22]. Toplinska vodljivost mjeri se impulsno i to tako da laser šalje snop toplinske energije, a termoelement, postavljen s druge strane predmeta, mjeri promjenu temperature ovisno o vremenu. Moguće je i predviđanje provođenja topline pomoću raznih softverskih aplikacija na temelju dostupnih podataka [22]. Toplinska vodljivost kao parametar više utječe na aluminij i njegove legure pri zavarivanju, nego na čelike jer se toplina brže odvodi s mjesta zavarenog spoja [1,5].

Kvaliteta površina vrha elektroda i radnih komada jedna je od važnijih stavki pri elektrootpornom zavarivanju i ima veliki utjecaj na kvalitetu zavora. Neodržavane površine vrha elektroda te nepripremljene površine radnih komada za posljedicu će imati promjene u kontaktnim otporima te lošu raspodjelu struje. Poznato je da povećanjem hrapavosti kontaktnih površina opada ukupni otpor između elektroda. Jedna od čestih grešaka koja se javlja je neuklanjanje masti i ulja s površine limova koji će se zavarivati. Limovi se za potrebe transporta premazuju uljnim filmovima te ako se ne uklone prije zavarivanja, mogu se razgraditi te atomi ugljika i vodika mogu difundirati u zavar i utjecati na pojavu pukotina i pogoršati mehanička svojstva. Također je važno pripaziti na isporuke materijala i šarže.

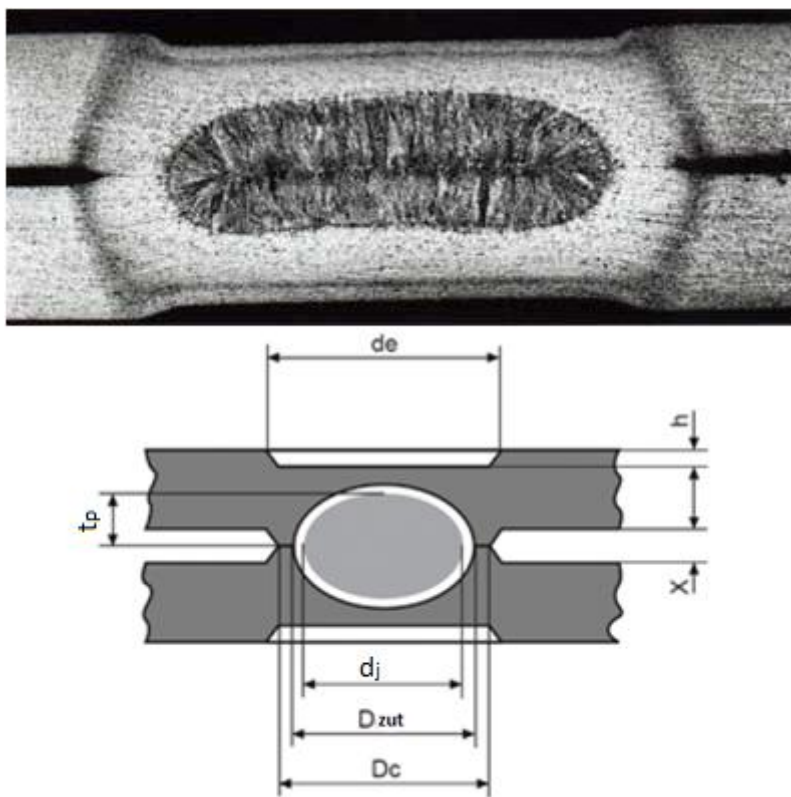
Stanje površina istog čelika često se razlikuje. Kod metala koji na površini razvijaju oksidne filmove, problem utjecaja stanja površine je još veći nego kod čelika. Utjecaj stanja površine je više izraženiji kod točkastog zavarivanja nego kod bradavičastog zavarivanja.

Čista i uredna okolina izvora struje važan je preduvjet za ostvarivanje kvalitetnih zavara. Ako je u proces zavarivanja uključen i radnik, on mora imati neometani pristup stroju te radnim komadima (pogotovo ako pridržava radne komade tijekom zavarivanja ili ih slaže u šablone). Elektrode moraju imati neometan pristup radnim komadima tako da uvijek mogu aplicirati podešenu silu pritiska [13]. Zgodno je imati pristup mjestu zavara s gornje i donje strane.

Razmak između zavarenih mjesta ima važan utjecaj na raspodjelu struje koja protječe, a samim tim i utječe na kvalitetu zavara koji se trenutno zavaruje. Tijekom zavarivanja često dolazi do pojave skretanja struje (eng. shunt) gdje struja djelomično skreće prema prethodno zavarenom mjestu. Struja skretanja može iznositi i do 40 % vrijednosti struje zavarivanja [1]. Utjecaj struje skretanja raste s povećanjem broja zavara. Razmak između zavara nema isti utjecaj na sve vrste elektrootpornog zavarivanja. Primjerice, kod bradavičastog zavarivanja to je manje izraženo nego kod točkastog, odnosno moguće je postaviti manji razmak između zavara. Međutim, taj razmak treba biti jasno definiran i on ovisi o debljini komada koji se zavaruje [1].

4. GEOMETRIJA ZAVARA

Na slici 24. prikazana je geometrija zavora kod elektrootpornog zavarivanja.



Slika 24. Geometrija zavora [4,6]

Tijekom skrućivanja točke, elektroda prodire u metal te ostavlja otisak koji ima oblik vrha elektrode definiran promjerom elektrode (kod bradavičastog zavarivanja elektroda ne ostavlja takav otisak pošto njen vrh ima veliku i ravnu površinu) d_e . Otisak mora biti gladak i ravnomjeran. Otisak je također definiran dubinom h . Promjer jezgre zavora d_j odgovara zoni metalne veze u ravnini kontakta elemenata koji se spajaju. Ta veličina se najčešće uzima neposredno u proračunu čvrstoće točkasto zavarenih spojeva i sličnim razmatranjima. Najtočnije se određuje mikrografskim ispitivanjem [1]. Penetracija t_p je maksimalna udaljenost ravnine spajanja i konture jezgre te se izražava u postocima u odnosu na debljinu lima. Razmak između limova x javlja se nakon oblikovanja zavarene točke i ne utječe bitnije na mehaničku nosivost spoja. D_{ZUT} je promjer ZUT-a, odnosno obuhvaća promjer jezgre zavora povećan za pojas ZUT-a. D_c je promjer zone difuzije. Obuhvaća područje gdje je došlo do makar djelomičnog taljenja.

5. ZAVARLJIVOST MATERIJALA POSTUPCIMA

ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA

Osnovna dva zahtjeva na kojima se zasniva elektrootporno zavarivanje su [1]:

- postojanje optimalnog kontaktnog otpora na mjestu dodira radnih komada, što uvjetuje intenzivno razvijanje topline putem Joule-ovog efekta,
- proces zagrijavanja putem Joule-ovog efekta mora biti brz i dinamičan.

Kao što je već spomenuto, kontaktni otpor na mjestu dodira dva metalna komada ovisi o poprečnom presjeku vodiča, vrsti materijala te o njegovim svojstvima (mehanička svojstva, toplinska i električna vodljivost). Višegodišnja istraživanja stručnjaka na području elektrootpornog zavarivanja pokazala su da zavarljivost materijala ovisi o velikom broju faktora. Ocjene zavarljivosti raznih metala prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Ocjene zavarljivosti raznih metala [1]

1-odlično 2-dobro 3-podnošljivo 4-loše 5-nedovoljno 6-nemoguće	Aluminij	Nehrđajući čelik	Mesing	Bakar	Pocinčani lim	Čelik	Olovo	Nikl	Kromnikl (20% Cr, 80% Ni)	Cink	Fosfor bronca	Srebro
Aluminij	2	5	4	5	3	4	5	4	4	3	3	6
Nehrđajući čelik	5	1	5	5	2	1	6	3	3	6	4	4
Mesing	4	5	3	4	4	4	6	3	3	5	3	3
Bakar	5	5	4	5	5	5	5	4	4	5	3	3
Pocinčani lim	3	2	4	5	2	2	4	3	3	3	4	5
Čelik	4	1	4	5	2	1	6	3	3	6	3	4
Olovo	5	6	6	5	4	6	3	5	5	3	5	5
Nikl	4	3	3	4	3	3	5	2	1	6	4	2
Kromnikl (20% Cr, 80% Ni)	4	3	3	4	3	3	5	2	1	6	4	2
Cink	3	6	5	5	3	6	3	6	6	3	4	6
Fosfor bronca	3	4	3	3	4	3	5	3	4	4	2	2
Srebro	6	4	3	3	5	4	5	2	2	6	2	1

Iz tablice 2 vidljivo je da se elementi najbolje zavaruju kad se radi o istom materijalu. Međutim, postoje i slučajevi i kad nije tako. Primjerice, kad se zavaruju dva elementa od bakra, jako teško je dobiti kvalitetan zavareni spoj. Potrebne su jako visoke struje zavarivanja te elektrode od volframa ili molibdena. Slično vrijedi i za elemente od mesinga, ali u manjoj mjeri [1]. Berilijeva bronca, koja ima široku primjenu u industriji, generalno je dobro zavarljiva, međutim, parametri se moraju jako precizno podesiti i obavezna je naknadna toplinska obrada.

Elektrootporno zavarivanje aluminija i aluminijskih legura zahtijeva detaljno razmatranje i pripremu. Radi mehaničkih i metalurških svojstava aluminija i legura, potrebne su struje visokih gustoća te kratko vrijeme trajanja zavarivanja. Elektrode moraju biti od bakra ili bakrenih legura te moraju imati odličnu čvrstoću te biti redovno čišćene radi redukcije površinskog sloja aluminijevog oksida [1,16].

Nikl i niklene legure dobro se međusobno zavaruju točkastim zavarivanjem. Potrebne su visoke sile pritiska te umjerene jakosti struja radi male električne vodljivosti nikla [1].

Zavarivanje titana i njegovih legura mora se izvoditi u zaštiti inertnog plina. Niska toplinska i električna vodljivost omogućuju mu bolju zavarljivost od primjerice, aluminija.

Nehrđajući čelici generalno su dobro zavarljivi postupcima elektrootpornog zavarivanja, pogotovo zbog izvanredne postojanosti kontaktnog otpora. Najzanimljiviji su austenitni nehrđajući čelici radi svoje odlične otpornosti na koroziju te dobrih mehaničkih svojstava. Poteškoće se javljaju kod kromovih martenzitnih čelika koji imaju tendenciju samozakaljivanja [1,16].

5.1. Zavarljivost ugljičnih čelika postupcima elektrootpornog zavarivanja

Kod zavarivanja niskougljičnih čelika (primjerice čelik S235), mehanička svojstva zavara otprilike su jednaka svojstvima osnovnog metala. S povećanjem sadržaja ugljika iznad 0,1 % opaža se povećanje čvrstoće zavara radi zakaljene strukture [1]. Istodobno dolazi do smanjenja plastičnosti zavarenog spoja. Ako udio ugljika raste iznad 0,35 %, potrebna je naknadna toplinska obrada jer dolazi do pojave martenzitne mikrostrukture u jezgri zavarene točke. Utjecaj pojave martenzitne strukture može se smanjiti i udaljavanjem elektroda čim struja prestane teći kroz njih. Ukoliko se sadržaj ugljika povećava, takve mjere

predostrožnosti više nisu dovoljne jer je slobodno hlađenje zavara dovoljno da se prekorači kritična brzina hlađenja, odnosno stvori martenzitna struktura [1,16].

Toplinska obrada koja se provodi poslije zavarivanja naziva se žarenje. Za debljine do 2 mm moguće je provesti žarenje odmah nakon zavarivanja, dok se za veće debljine preporuča određena pauza [1]. Ukoliko i nakon žarenja nema poboljšanja u strukturi čelika, potrebno je razmotriti neke druge metode toplinske obrade.

6. GREŠKE KOD ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA

Za izvođenje kvalitetnih zavara kod elektrootpornog zavarivanja potrebno je poznavati puno faktora koji pojedinačno, ali i međusobno utječu na kvalitetu zavara. Krivo podešenje vrijednosti samo jednog parametra može dovesti do greške i nekvalitetnog zavara, u krajnjem slučaju i pucanja zavara.

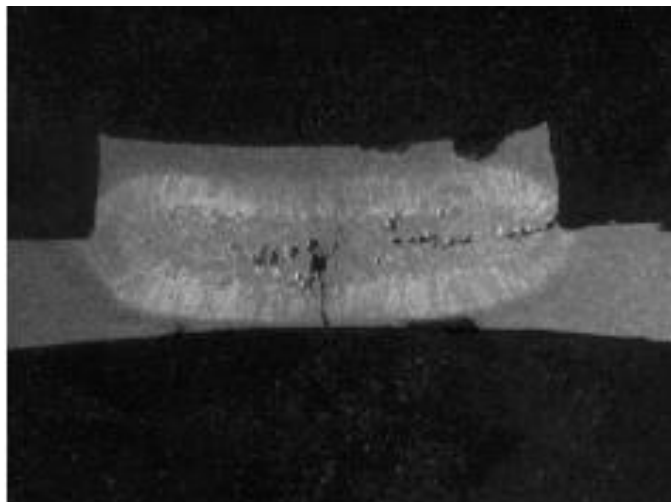
Najčešće greške kod elektrootpornog zavarivanja su [1,4]:

- pregrijavanje površine u zoni zavarene točke,
- pukotine,
- poroznost i šupljine,
- prevelika penetracija,
- nepravilni otisci elektroda,
- prskanje metala,
- nesimetričnost spoja.

Pregrijavanje u zoni zavarene točke izazvano je najčešće prevelikom jakosti struje, predugim vremenom zavarivanja, krivim odabirom elektroda (gdje se javlja preveliki kontaktni otpor s radnim komadom) te lošim stanjem površine vrha elektrode i radnog komada. Očituje se u vidu površinskih pukotina, promjene boje te pregaranja zone zavarene točke [1]. Za izbjegli pregrijavanje potrebno je pravilno podesiti jakost struje i vrijeme zavarivanja te odabrati elektrode koje neće stvarati preveliku toplinu u kontaktu s radnim komadima.

Pukotine su općenito jedan od najvećih i najopasnijih problema u zavarivanju. Najčešće su uzrokovane toplinskim naprezanjima koja su rezultat različitog stupnja širenja nejednako zagrijanih područja metala. Kod elektrootpornog zavarivanja nastaju zbog prekomjernog unosa topline (prevelika jakost struje ili predugo vrijeme zavarivanja) te zbog prevelike sile elektroda [1,23]. Mogu biti unutrašnje i površinske. Površinske pukotine sa sobom vuku i dodatnu nepogodnost u vidu smanjene korozijske otpornosti. Pukotine se često javljaju i kod prebrzog hlađenja čelika koji su skloni pretjernom očvršćivanju te kod prekratkog vremena držanja [4,12,23]. Mogu nastati u zoni taljenja ili u ZUT-u te mogu biti hladne ili tople pukotine [23]. Ovisno o razlogu nastajanja pukotine, moguće ih je spriječiti na veliki broj načina. Neki od njih su pravilno podešenje jakosti struje i vremena zavarivanja, pravilno podešenje vremena držanja i vremena hlađenja, pravilno podešenje sile elektroda te osigurati

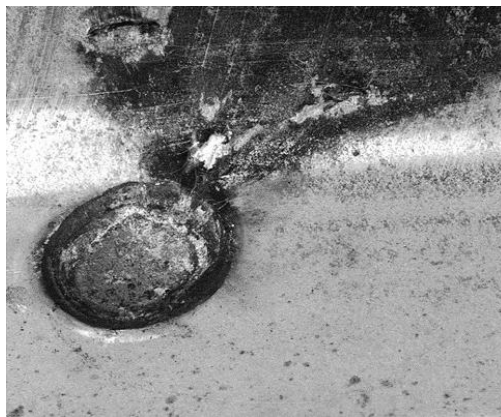
dobro hlađenje elektroda. Na slici 25 prikazana je površinska pukotina. Također su vidljive šupljine u jezgri zavora.



Slika 25. Površinska pukotina i šupljine u jezgri zavora [24]

Poroznost i šupljine rezultat su pojave mjehurića od plinova pri zavarivanju. Dio tih mjehurića oslobađa se u periodu dok je metal još u tekućem stanju i kako se jezgra otvrdnjava, mjehurići imaju tendenciju ostati u jezgri. Moguće je i da vodik završi u jezgri zavora radi nekvalitetno pripremljene površine radnog komada (radni materijal se premazuje uljem radi transporta i vodik može tijekom zavarivanja difundirati iz ulja koje se sastoji od ugljikovodika). U sprečavanju pojave poroznosti i šupljina važnu ulogu ima sila pritiska elektroda. Premala sila elektroda ili pak, nedostatak sile, može uzrokovati pojavu većeg broja šupljina i poroziteta [4].

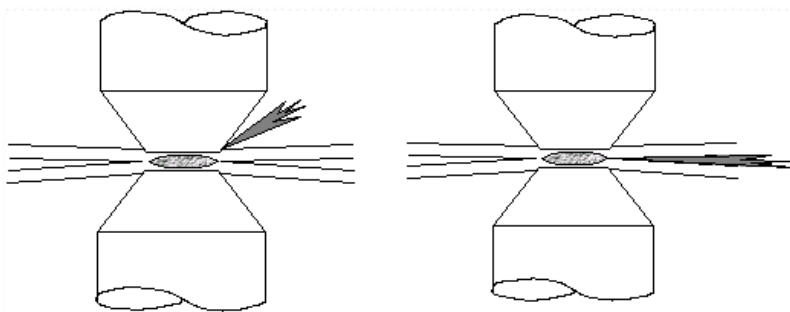
Prevelika penetracija očituje se u narušenoj estetici zavora te eventualnom razaranju zavora. Nastaje zbog previsoke jakosti struje i predugog vremena zavarivanja, velike razlike u debljini elemenata, neadekvatne pripreme površine te neodgovarajućeg vrha elektrode. Na slici 26 prikazana je posljedica prevelike penetracije. Na slici se ujedno vidi kako prevelika penetracija sa sobom vuče kao posljedicu i curenje metala.



Slika 26. Prevelika penetracija [24]

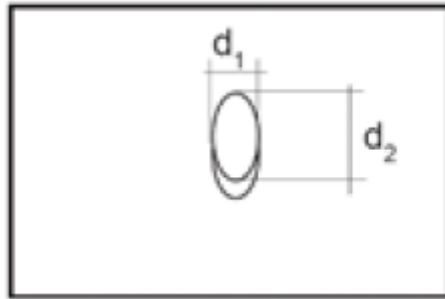
Nepravilni otisci elektroda nastaju pod djelovanjem sile elektroda. Uzroci su najčešće prevelika sila elektroda tijekom zavarivanja, neodgovarajući oblik vrha elektrode, prevelika jakost struje zavarivanja te prskanje metala između komada koji se zavaruju [1]. Nepravilan otisak nastaje i kad vrh elektrode ne priliježe okomito na radni komad.

Prskanje odnosno curenje metala prvenstveno nastaje zbog nedovoljno velike sile elektroda. Uz to, može nastati i zbog slabo pripremljene sile površine te nejednolikog kontaktnog otpora između radnih komada [1]. Prskanje metala je najčešće neizbježno, pogotovo kod bradavičastog zavarivanja, ali ga se može smanjiti na minimum i kontrolirati [24]. Postoje i metode za predviđanje količine prskanja, a onu uključuju složenu analizu (termodinamička analiza tlaka u tekućoj jezgri zavora, analiza sila u zavoru, analiza sile elektrode) [24]. Za smanjivanje prskanja potrebno je podesiti dovoljno veliku silu elektroda, kvalitetno pripremiti površinu komada te održavati ispravnost stroja za zavarivanje pošto nejednolikost u gibanju i poziciji elektroda može povećati pojavu prskanja. Na slici 27 prikazana su 2 načina prskanja (curenja) metala.



Slika 27. Prskanje metala [25]

Nesimetričnost spoja ogleda se u nesimetričnosti zavarene točke u odnosu na ravninu spoja radnih komada (npr. veća penetracija u jedan lim, a manja u drugi) [1]. Na slici 28 prikazana je nesimetričnost spoja uzrokovana nepravilnim namještanjem elektroda.



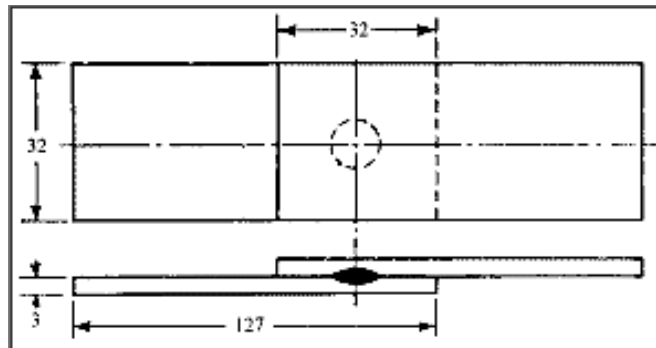
Slika 28. Nesimetričnost spoja [4]

7. ISPITIVANJE ELEKTROOTPORNO ZAVARENIH SPOJEVA

Ispitivanja elektrootporno zavarenih spojeva dijele se na razorna i nerazorna. Među razorna ispitivanja spadaju [1,4,26]:

- ispitivanja istezanjem na smik zavarene točke
- ispitivanja torzijom zavarene točke,
- ispitivanja čupanjem zavarene točke,
- ispitivanje razdvajanjem,
- makroskopska i mikroskopska.

Ispitivanje istezanjem na smik zavarene točke ili smično ispitivanje služi za određivanje prekidne sile istezanja na smik zavarene točke. Prekidna sila nije čista sila smika jer povećanjem naprezanja dolazi i do deformacije ispitne epruvete pa dolazi i do vlačnih naprezanja u zavarenoj točki. Najčešće se koristi kao način ispitivanja statičke opteretivosti točkasto zavarenih spojeva [1]. Na slici 29 shematski je prikazan uzorak za smično ispitivanje. Uzorak se odnosi na točkasto zavareni spoj. Za neke druge vrste elektrootpornog zavarivanja koriste se drugačiji uzorci.

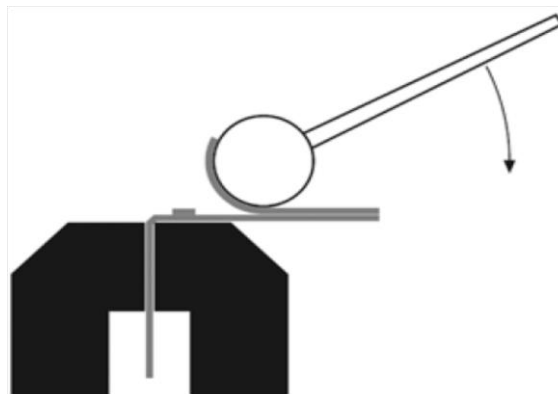


Slika 29. Uzorak za smično ispitivanje [27]

Pokus torzijom se izvodi ručno ili pomoću stega te daje brzu i kvalitetnu procjenu zavarenih točaka i veličinu promjera zavarene točke. Kao kriterij kvalitete najčešće se uzima kut uvijanja ili moment koji točka može izdržati.

Pokus čupanjem (ljuštenjem) koristi se za brzu procjenu vrijednosti promjera zavarenog spoja i neophodan je kod ispitivanja parametara prije izvođenja propisanih pokusa i zbog provjeravanja parametara u toku proizvodnje. Može se izvesti ručno i mehanizirano. Kod ručnog izvođenja može se koristiti specijalni alat, ali mogu se koristiti npr. kliješta kod

bradavičasto zavarenih spojeva žica ili žica i cijevi. Na slici 30 prikazan je princip ispitivanja sa specijalnim alatom.



Slika 30. Ispitivanje čupanjem (ljuštenjem) [4]

Za pokus razdvajanja limova ili radnih komada koristi se alat koji podsjeća na dlijeto. Takav alat se postavi između limova i razdvaja limove te na taj način izaziva naprezanje u zavaru. Ako je postupak mehaniziran, moguće je mjeriti silu razdvajanja. Kad se razdvajanje završi, provjeravaju se dimenzije odnosno geometrija zavarene točke.

Za makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarena točka se presječe (na malom razmaku od sredine i to na sobnoj temperaturi), a zatim se brusi i polira. Da bi zavarena točka postala vidljiva uzorak se mora nagrizzati u određenom sredstvu. Za mikroskopska ispitivanja zavarena točka se nakon poliranja još fino polira te se onda nagrizza. Na uzorcima za takva ispitivanja moguće je izvoditi i test tvrdoće (prema ISO 15614-12:2007 neobavezno, osim ako ne postoji specifični zahtjev).

Među nerazorna ispitivanja spadaju [1,26]:

- vizualno ispitivanje,
- ispitivanje magnetskom metodom,
- ispitivanja penetrantima,
- ispitivanje ultrazvukom,
- radiografsko ispitivanje.

Vizualno ispitivanje potrebno je kod svakog zavara i takvim ispitivanjem moguće je uočiti nepravilnosti poput prevelike penetracije, pukotina i šupljina koje se otvaraju prema površini, curenja metala, itd. Vizualno ispitivanje potrebno je izvoditi u odgovarajućim uvjetima.

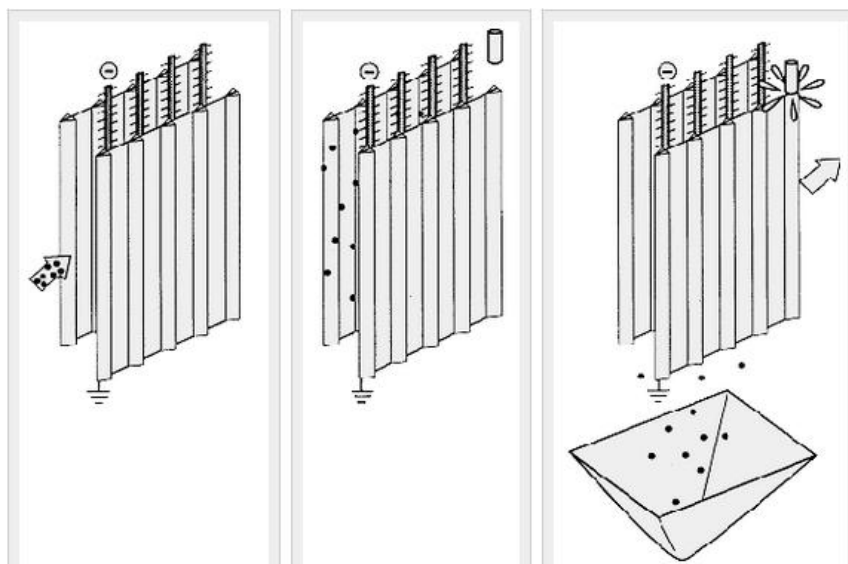
Ispitivanjima magnetskom metodom i penetrantima moguće je otkriti površinske pukotine i nepravilnosti s tim da se češće koristi penetrantska metoda. Ispitivanje ultrazvukom dosta je ograničeno kod elektrootpornog zavarivanja radi otisaka koji ostavljaju elektrode u površinu lima. Radiografskim ispitivanjima moguće je otkriti pukotine (osim okomitih na pravac zračenja), poroznost te prskanje.

8. EMISIONE ELEKTRODE

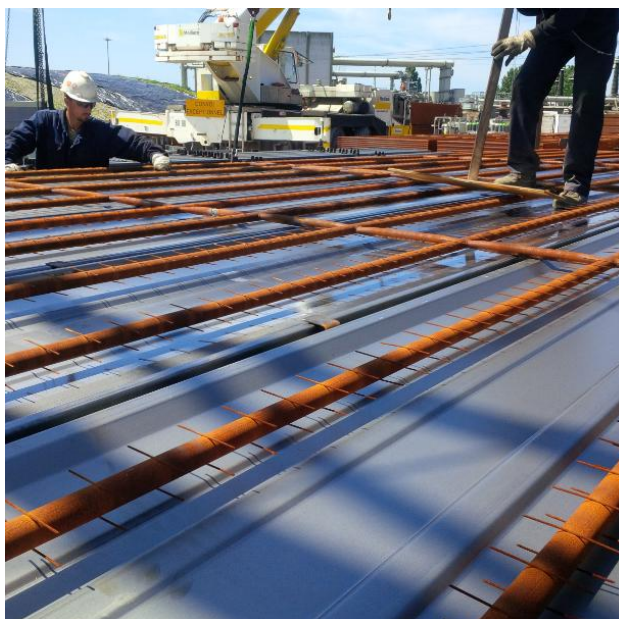
Emisione elektrode su zapravo dijelovi elektro-precipitacijskog filtera. Takvi filteri koriste se za izdvajanje krutih čestica iz struje otpadnih plinova te se najčešće nalaze u sklopu raznih elektrana [28,29]. Imaju veliku efikasnost i to do 99,9 % te zadržavaju čestice od 0,01 μm do 500 μm [29]. Imaju brojne prednosti poput visoke ekonomičnosti u radu, mogućnosti kontinuiranog rada te lakog održavanja, međutim postoje i loše strane poput visokog troška nabave te zauzimaju puno prostora [29].

Princip rada se temelji na tome da plinovi, koji sadrže krute čestice koje su nepoželjne u atmosferi, prolaze kroz filter odnosno odvajač koji odvaja krute čestice te naposljetku izlaze iz filtera bez tih čestica ili s određenim postotkom čestica čija je minimalna vrijednost propisana [28]. Nakon što struja plina uđe kroz otvor u filter, prolazi kroz ionizirajuća polja koja stvaraju emisione elektrode, koje su pod visokim naponom. Emisione elektrode zapravo, na principu "corona" efekta, emitiraju negativno nabijene ione u struju plina prema česticama te ih mijenjaju, odnosno mijenjaju im naboj. Na taj način krute čestice odlaze prema dnu gdje se nalaze pozitivno nabijeni sabirnici krutih čestica koji se poslije jednostavno isprazne [28].

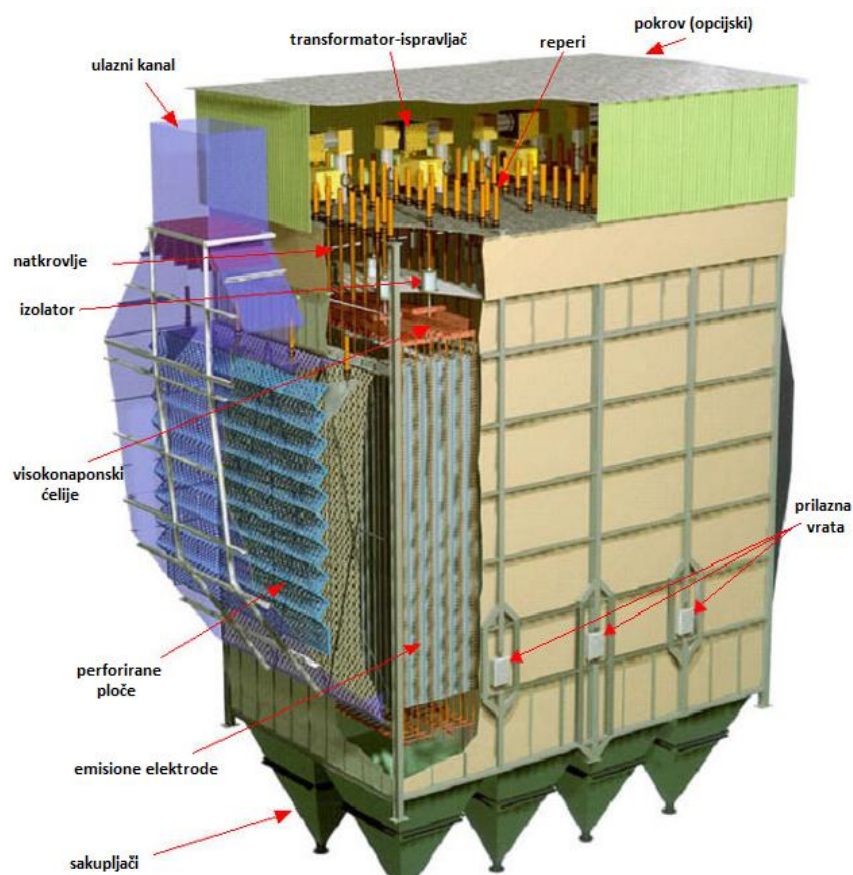
Na sljedećim slikama prikazani su princip rada emisionih elektroda, montaža emisionih elektroda te elektro-precipitacijski filter.



Slika 31. Princip rada emisionih elektroda [28]



Slika 32. Montaža emisionih elektroda [19]

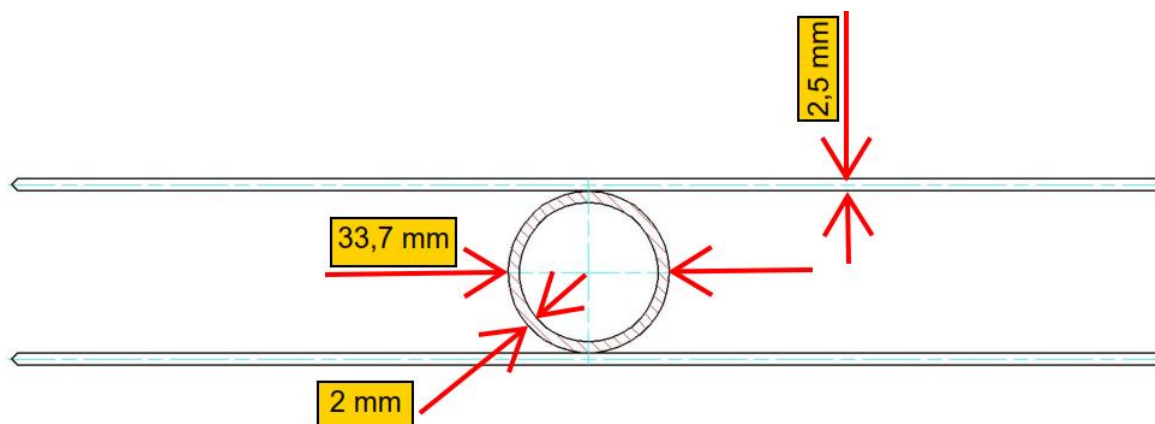


Slika 33. Elektro-precipitacijski filter [28]

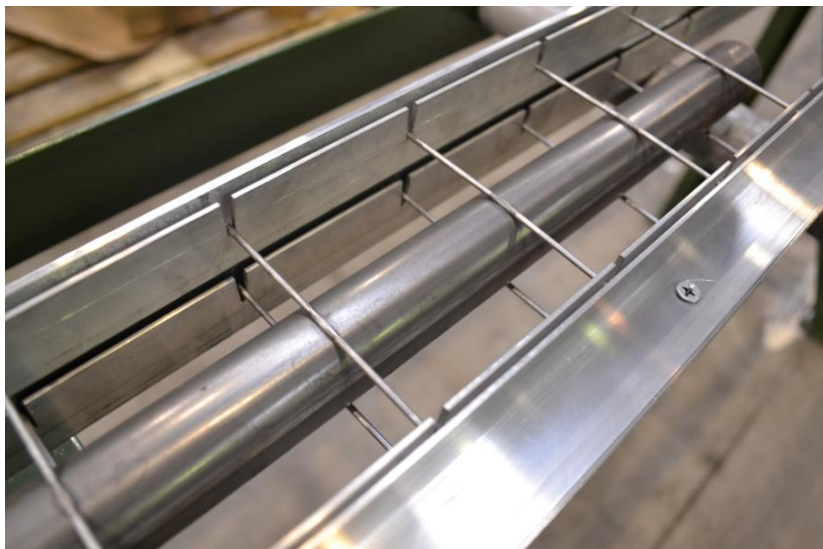
8.1. Materijal i elementi emisionih elektroda

Emisione elektrode izrađene su od čelika S235JR i S235 JRH (prema HRI CEN ISO/TR 15608:2008 spada u grupu 1.1). Radi se o konstrukcijskom čeliku široke primjene s minimalnom granicom razvlačenja od 235 N/mm^2 za debljinu od 16 mm [30]. Prema normi EN 10025:2004 spada u nelegirajuće konstrukcijske čelike. Mehaničke karakteristike i kemijski sastav omogućuju mu lako oblikovanje te dobru zavarljivost [31]. Upotrebljava se za gradnju mostova, nebodera, proizvodnih hala, tračnica, itd. Oznaka JR u nazivu označava da je čelik testiran Charpyevom metodom pri sobnoj temperaturi (20°C) i da je udarni rad loma 27 J prema EN 10027. Oznaka H označava da se radi o šupljem profilu.

Emisione elektrode sastoje se od dva elementa, cijevi (S235 JRH) promjera 33,7 mm i debljine stijenke 2 mm te žice (S235 JR) promjera 2,5 mm. Bradavičastim zavarivanjem žice su zavarene okomito na cijev i to s dvije strane, po vanjskom promjeru. Razmak između žica je cca. 80 mm. Na slici 34 prikazan je presjek sklopa te dimenzije, a na slici 35 prikazan je dio emisione elektrode (postavljena u šabloni za zavarivanje).

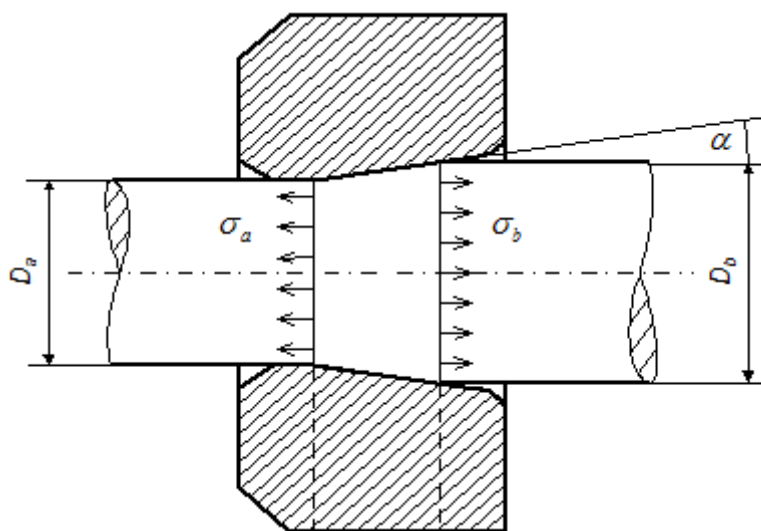


Slika 34. Presjek sklopa žica-cijev



Slika 35. Emisiona elektroda [19]

Cijevi su prvo hladno oblikovane (savijane) pomoću posebne matrice te potom zavarene po duljini, dakle radi se o šavnim cijevima. Žica se izrađuje provlačenjem gdje se šipkasti materijal većeg promjer od žice provlači kroz matricu i mijenja geometriju poprečnog presjeka (sužava se) te samim tim očvršćuje ovisno o stupnju redukcije [31]. Na slici 36 shematski je prikazano provlačenje gdje se vidi kako šipkasti materijal većeg promjer D_b prolazi kroz matricu s kutom provlačenja α te izlazi materijal manjeg promjera D_a .



Slika 36. Postupak izrade žice provlačenjem [31]

9. EKSPERIMENTALNI RAD

9.1. Cilj eksperimentalnog rada

Cilj eksperimentalnog rada bio je pronaći optimalno područje parametara zavarivanja za emisije elektrode, povećati proizvodnost istog proizvoda te zadovoljiti minimalna potrebna mehanička svojstva, odnosno smanjiti problem naljepljivanja koji se javljao tijekom proizvodnje. Naime, u tvrtci ZM-Vikom, koja proizvodi dotični proizvod, u opticaj su došle žice sa različitim vrijednostima vlačne čvrstoće, iako su žice pripadale istoj šarži. Posljedica toga su dobivena različita mehanička svojstva zavara ako se obe vrste žica zavare s istim parametrima. Uz to, potrebno je bilo i povećati proizvodnost. Problem optimiranja zajedničkih parametara te povećanje proizvodnosti moguće je riješiti skraćivanjem ukupnog vremena zavarivanja te kompromisnim odabirom parametara za zavarivanje sklopova žica-cijev s obe vrste žica tako da proizvod u konačnici ima ujednačena mehanička svojstva. Uz skraćenje vremena zavarivanja, potrebno je bilo korigirati ostale parametre kako bi se izbjegli problemi poput naljepljivanja. Za odabir konačnih zajedničkih parametara zavarivanja potrebno je više uzoraka te samim tim dulja razdoblja ispitivanja. U tablici 3 prikazana su ukupna vremena zavarivanja svih šest uzoraka u odnosu na referentne uzorke P2 i P3.

Tablica 3. Ukupna vremena zavarivanja uzoraka u odnosu na uzorke P2 i P3

Uzorak	P2	Test 1	Test 2	Test 3	P3	Test 4	Test 5	Test 6
Ukupno vrijeme zavarivanja	130	95	98	86	98	69	72	72
Razlika u odnosu na P2 i P3 (%)	-	27	25	34	-	30	27	27

9.1. Zavarivanje uzoraka

U eksperimentalnom dijelu rada zavareno je 6 različitih uzoraka emisionih elektroda (uz uzorke P2 i P3 koji su otprije zavareni i atestirani) postupkom bradavičastog elektrootpornog zavarivanja te su uzorci nakon toga ispitani u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Zavareni uzorci ispitani su sukladno normi HRN EN ISO 15614-12:2007 [26]. Korišteni izvor struje je Tv-80P/550 TECNA s maksimalnom jakosti struje od 28 kA. Na slici 37 prikazan je trenutak neposredno prije zavarivanja sklopa žica-cijev.



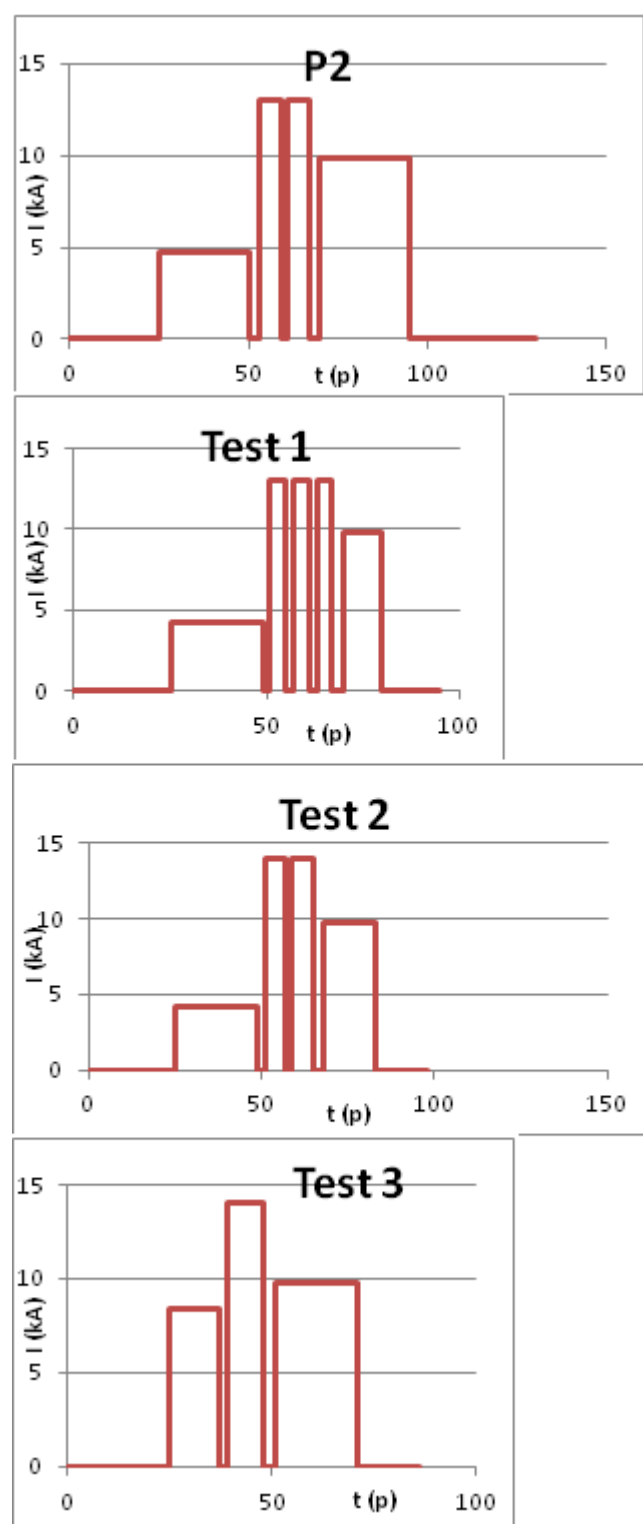
Slika 37. Trenutak neposredno prije zavarivanja sklopa žica-cijev [19]

Zavareno je 6 sklopova žica-cijev, odnosno cijevi duljine 800 mm po kojima je na svakih 80 mm raspoređen jedan par žica. Žice su bile podijeljene u dvije vrste, sukladno vrijednostima vlačne čvrstoće (jedna vrsta žica je imala vrijednosti vlačne čvrstoće od 700 N/mm² do 750 N/mm², a druga vrsta je imala od 750 N/mm² do 800 N/mm²). Sukladno tome, određivani su i parametri zavarivanja ovisno o svojstvima žica. Zavarivanje je obavljeno u tvrtci ZM-Vikom u Šibeniku. U tablici 4 prikazani su parametri za svih 8 uzoraka.

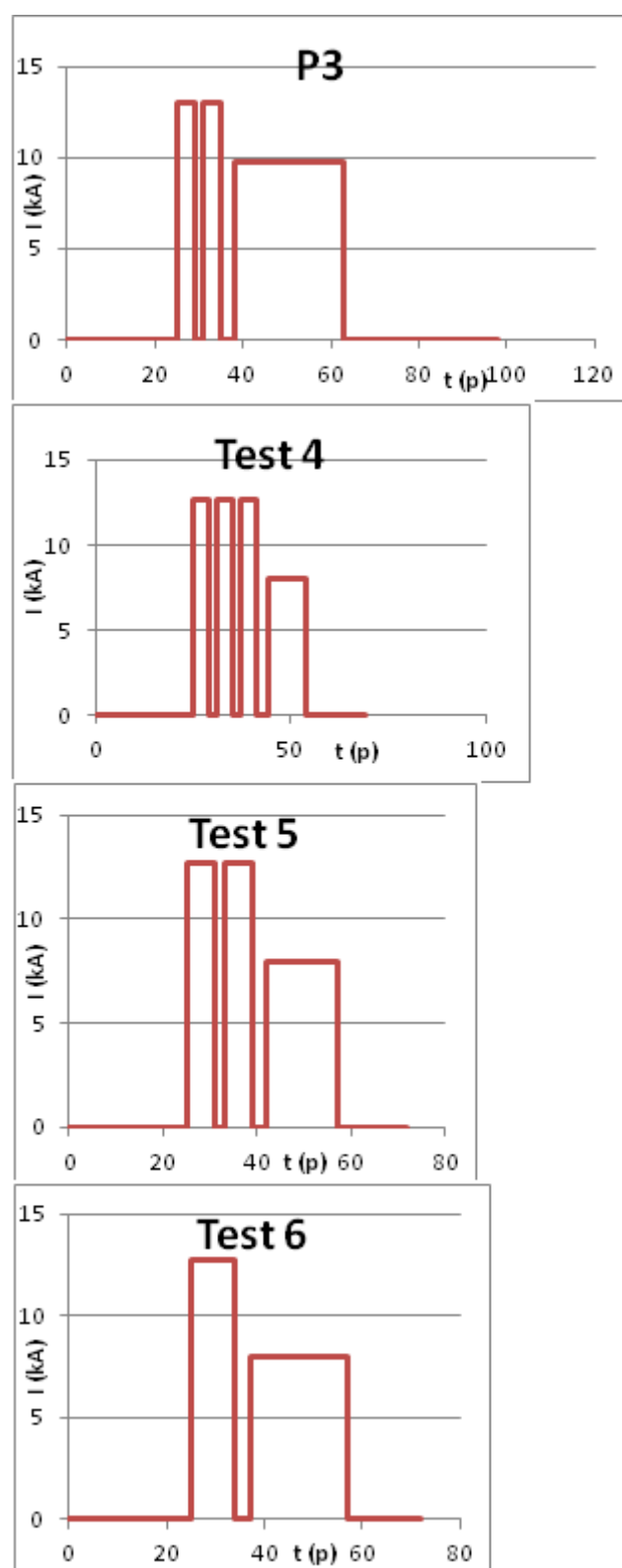
Tablica 4. Parametri zavarivanja uzoraka

Parametri	Jedinica	P2	Test 1	Test 2	Test 3	P3	Test 4	Test 5	Test 6
Vrijeme pritiska	Perioda	25	25	25	25	25	25	25	25
Struja predgrijavanja	kA	4,76	4,2	4,2	8,4	0	0	0	0
Vrijeme predgrijavanja	Perioda	25	24	24	12	0	0	0	0
Vrijeme pauze predgrijavanja	Perioda	3	2	2	2	0	0	0	0
Vrijeme postizanja pune razine programirane struje	Perioda	0	0	0	0	0	0	0	0
Jakost struje	kA	13	13	14	14	13	12,7	12,7	12,7
Vrijeme prolaska struje	Perioda	6	4	6	9	4	4	6	9
Broj impulsa u jednom ciklusu zavarivanja	P	2	3	2	1	2	3	2	1
Vrijeme hlađenja između impulsa	Perioda	2	2	2	0	2	2	2	0
Vrijeme slabljenja pune razine programirane struje	Perioda	0	0	0	0	0	0	0	0
Vrijeme pauze	Perioda	3	3	3	3	3	3	3	3
Jakost struje žarenja	kA	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	8	8	8
Vrijeme prolaska struje	Perioda	25	10	15	20	25	10	15	20
Vrijeme držanja	Perioda	35	15	15	15	35	15	15	15

Na slici 38 prikazani su dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za uzorke P2, test 1, test 2 i test 3. Na slici 39 prikazani su dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za uzorke P3, test 4, test 5 i test 6. Na slikama se jasno vide razlike u parametrima između različitih uzoraka, odnosno različite površine ispod tijeka struje i vremena.



Slika 38. Dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za P2, test 1, test 2 i test 3



Slika 39. Dijagrami jakosti struje i vremena zavarivanja za P3, test 4, test 5 i test 6

Na slici 40 prikazan je stroj za bradavičasto elektrootporno zavarivanje. Žutom bojom označena je pedala kojom se pokreće proces zavarivanja, crvenom bojom označen je pneumatski cilindar kojim se ostvaruje sila na elektrode dok je bijelom bojom označen rashladni sustav stroja (vodeno hlađenje). Na slici 41 prikazan je dio šablone u koju se prvo postavlja donji red žica, zatim se postavlja cijev te gornji red žica. Šablona se zatim pritegne vijcima (označen žutom bojom na slici 41). Plavom bojom označen je jedan od valjaka po kojima se kreće sklop u šabloni.



Slika 40. Stroj za bradavičasto elektrootporno zavarivanje sklopa žica-cijev [19]



Slika 41. Dio šablone za postavljanje žica i cijevi [19]

Uzorci P2, test 1, test 2 i test 3 sadrže žicu koja ima vrijednosti vlačne čvrstoće od 750 N/mm^2 do 800 N/mm^2 dok uzorci P3, test 4, test 5 i test 6 sadrže žicu koja im vrijednosti od 700 N/mm^2 do 750 N/mm^2 . Iz tablice 3 vidljivo je da uzorci s većom vrijednosti vlačne čvrstoće žice u cijelom ciklusu zavarivanja imaju i predgrijavanje (radi veće čvrstoće, odnosno krutosti) kako bi se lakše provelo zbližavanje i spriječilo eventualno zakaljivanje. Parametri P2 i P3 koriste se već neko vrijeme u zavarivanju u proizvodnom pogonu tvrtke ZM-Vikom, ovisno o vrsti žice koja se zavaruje na cijev. Problemi vezani za različite žice opisani su u poglavlju 9.1. Iz tablice 4 je također vidljivo minimalno smanjenje vremena zavarivanja, ali i značajno smanjenje ostalih vremena (predgrijavanja, žarenja i držanja) za uzorke test 1 do test 6 u odnosu na P2 i P3. Dodatno je moguće smanjiti vrijeme zavarivanja skraćanjem vremena rukovanja radnim komadima uvođenjem automata za dodavanje žice ili cijevi (trenutno to obavlja 6 radnika).

9.2. Ispitivanje uzoraka

Prema HRN EN ISO 15614-12:2007 provedeno je 5 vrsta ispitivanja: vizualni pregled, smična proba, proba čupanja (s normalnim naprežanjem), ispitivanje tvrdoće te analiza makroizbrusaka [26].

9.2.1. Priprema uzoraka

Na slici 42 prikazani su uzorci prije same obrade. Vidljivo je 6 uzoraka, a također se može primjetiti da su na nekim uzorcima različite duljine žice radi lakše mogućnosti transporta. Dulje žice naknadno su skraćene na duljinu kraćih žica.



Slika 42. Uzorci spremni za rezanje i daljnju pripremu [19]

Na svakom uzorku nalazilo se 9 pari žica te je dogovoreno da će se po 1 komad iz svakog uzorka pripremiti za makroizbrusak, odnosno za mjerenje tvrdoće. Po 4 komada iz svakog uzorka su bila određena za smičnu probu te 4 komada za mehaniziranu probu čupanja. Svaka cijev rezala se na komade na tračnoj pili (GBS 185 Eco AutoCut), kako je i prikazano na slici 43.



Slika 43. Priprema uzoraka rezanjem na tračnoj pili [19]

Na slici 44 prikazani su svi uzorci pripremljeni za ispitivanja.

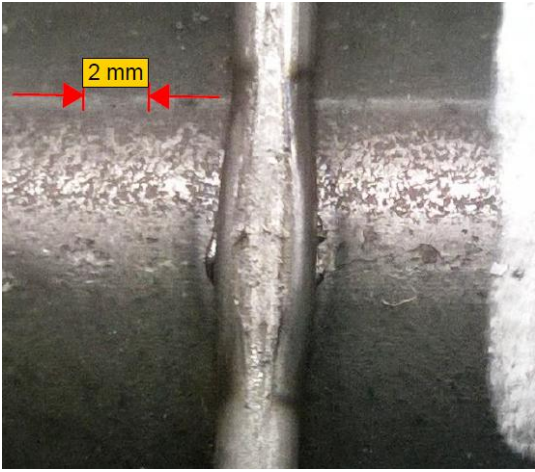
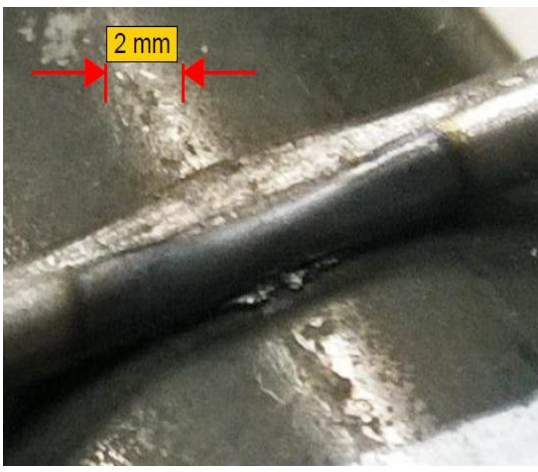
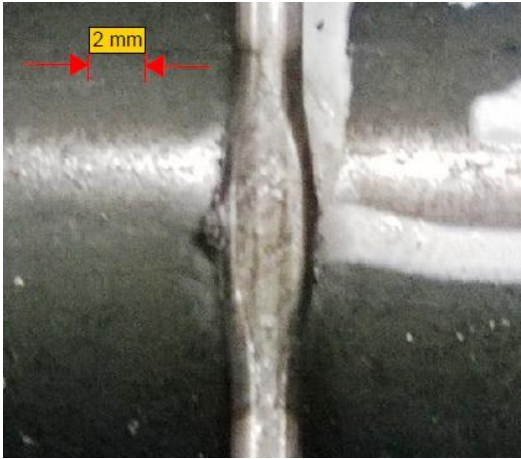
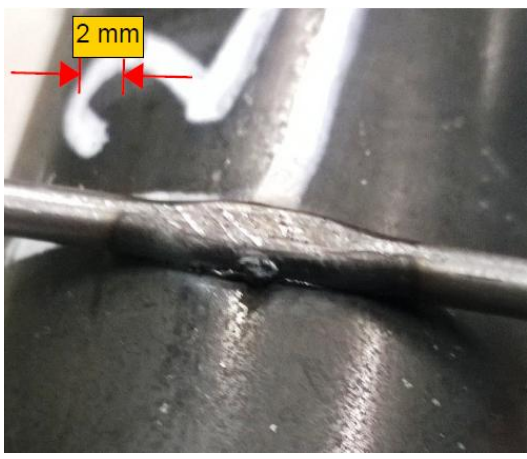
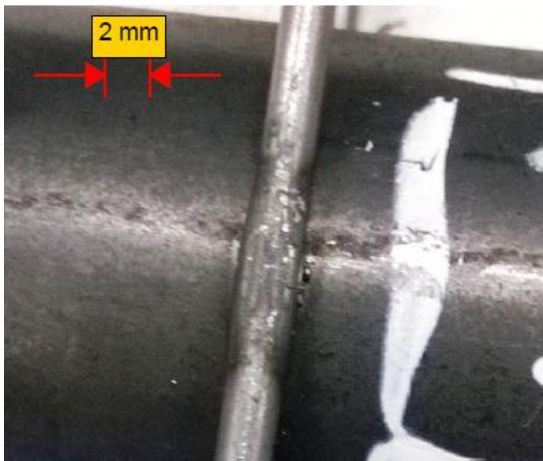



Slika 44. Svi uzorci pripremljeni za ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-12:2007 [19]

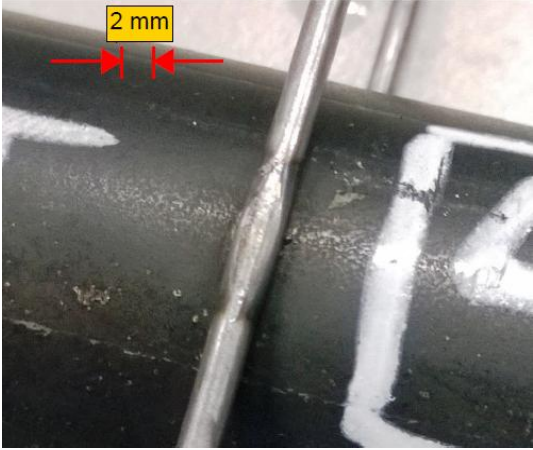

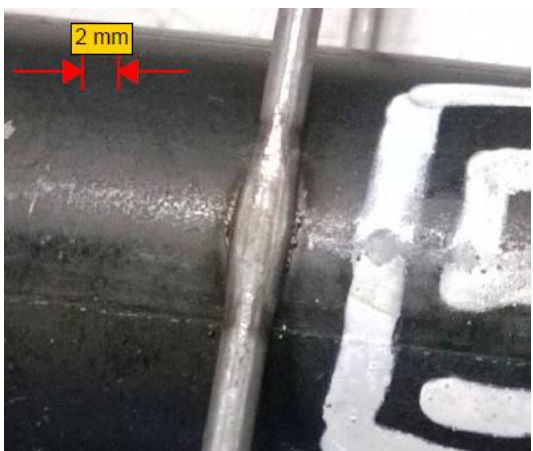

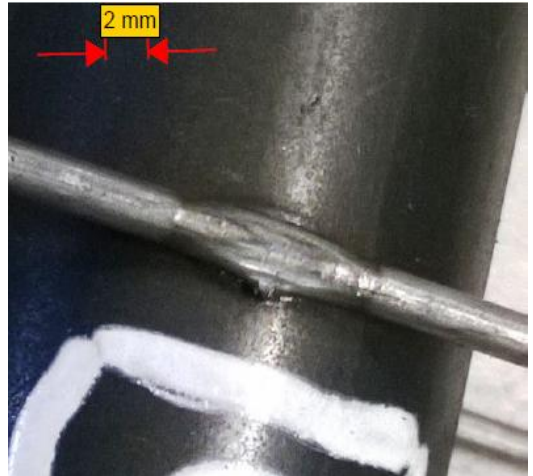
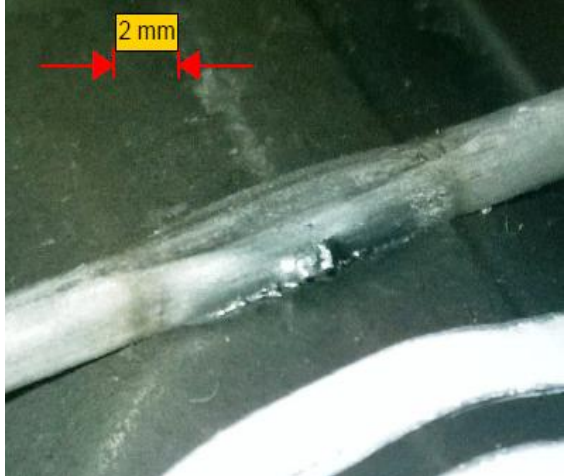
9.2.2. Vizualni pregled

Prema normi HRN EN ISO 15614-12:2007, sve uzorke je potrebno vizualno ispitati. Ispitana su 54 uzorka prateći smjernice zadane u normama HRN EN ISO 15614-12:2007 te HRN EN ISO 17637:2012 [26,32]. Na uzorcima ne smije biti površinskih pukotina, ostataka bakrenih elektroda, rasprskavanja te ostalih nepravilnosti. U tablicama 5 i 6 prikazan je po 1 uzorak, odozgo te sa strane.

Tablica 5. Vizualna kontrola uzoraka test 1, test 2 i test 3

Test 1		
Test 2		
Test 3		

Tablica 6. Vizualna kontrola uzoraka test 4, test 5 i test 6

Test 4		
Test 5		
Test 6		

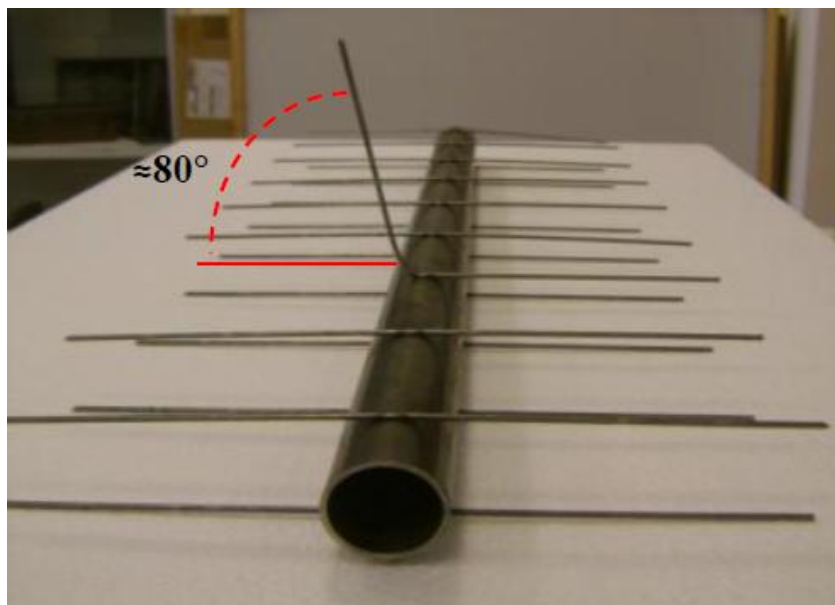
Tijekom vizualne kontrole svih uzoraka utvrđeno je da nema površinskih pukotina te ostataka bakrene elektrode. Nepravilnosti su se uglavnom pojavljivale u obliku prskotina i to bočno sa strane žice. Iako po normi HRN EN ISO 15614-12:2007 ne smije biti prskotina, odnosno rasprskavanja, specifičnim zahtjevom utvrđeno je da prskotine smiju biti minimalne te da žica po presjeku iznad sredine zavara ne smije biti previše staljena. U tablici 5 vidljivo je da žica iz uzorka testa 1 nije previše staljena te da ima prskotina, ali one nisu u tolikoj mjeri prisutne da bi uzorak bio vizualno neprihvatljiv. Žica uzorka test 2 je puno više staljena te ima puno rasprskavanja, što je direktna posljedica veće jakosti struje i duljeg vremena zavarivanja u odnosu na uzorak testa 1, iako ima 1 impuls zavarivanja manje. Može se zaključiti da je uzorak test 2 vizualno neprihvatljiv. Uzorak test 3 je vizualno prihvatljiviji od uzorka testa 1 radi manje rasprskavanja i manje staljenosti žice. Vizualna prihvatljivost uzorka test 3 posljedica je manjeg unosa topline u radni komad, radi jednog impulsa manje, iako je vrijeme trajanja impulsa dulje nego kod uzorka test 2.

U tablici 6 vidljivo je da žica kod uzoraka test 4 i 5 nije previše staljena te da su prskotine minimalne. Moguće je uočiti da je žica uzorka test 5 više staljena radi duljeg trajanja impulsa zavarivanja, iako ima jedan impuls manje. Oba uzorka su vizualno prihvatljiva. Uzorak testa 6 ima više prskotina te je žica više staljena u odnosu na uzorke test 4 i 5, međutim, vizualno je prihvatljiviji nego uzorak test 2 te kao takav zadovoljava minimum vizualne prihvatljivosti.

Interesantno je uočiti da kod žica s vrijednosti vlačne čvrstoće od 750 N/mm^2 do 800 N/mm^2 , na staljivanje žice i pojavu prskotina više utječe jakost struje i broj impulsa nego trajanje jednog impulsa zavarivanja dok kod žica s vrijednosti vlačne čvrstoće od 700 N/mm^2 do 750 N/mm^2 je obrnuto. Kod takvih žica veći utjecaj ima trajanje jednog impulsa zavarivanja nego jakost struje i broj impulsa.

9.2.3. Kontrola savijanjem

Iako kontrola savijanjem ne spada pod preporučena ispitivanja prema HRN EN ISO 15614-12:2007, radi specifičnog zahtjeva ipak ju je potrebno napraviti. Nakon obavljene vizualne kontrole, napravljena je kontrola savijanjem. Specifičnim zahtjevom preporučeno je saviti 3 žice svakog uzorka kako je prikazano na slici 45.



Slika 45. Kontrola savijanjem [19]

Kontrola savijanjem predstavlja jednu vrstu predostrožnosti i izvodi se na slijedeći način: prstima se uhvati kraj žice te se žica savije do kuta od maksimalno 80° i ta radnja se ponavlja nekoliko puta. Ispravno zavarena žica mora pucati u ZUT-u te je preporučeno da izdrži barem 3 savijanja prije pucanja. Po 3 žice od svakog uzorka su savijane. Žice na uzorku test 1 su sve izdržale barem 3 savijanja, dok je kod uzorka test 3 jedna žica pukla pri trećem savijanju, a ostale su zadovoljile minimum zahtjeva. Dvije žice na uzorku test 2 izdržale su 2 savijanja dok je jedna pukla u zavaru. Sve žice uzorka test 4 zadovoljile su minimum zahtjeva, dok su kod uzorka test 5 dvije žice zadovoljile, a jedna je pukla nakon 2 savijanja. Zanimljivo je da nijedna žica na uzorku test 6, koji ujedno vizualno jedva zadovoljava, nije izdržala minimum zahtjeva, već sve pucaju s trećim savijanjem. Na slici 46 prikazani su uzorci test 2 i 4 gdje se jasno vidi pucanje u ZUT-u te pucanje u zavaru.



a)

b)

Slika 46. a) pucanje žice u ZUT-u uzorka test 4, b) pucanje žice u zavaru uzorka test 2 [19]

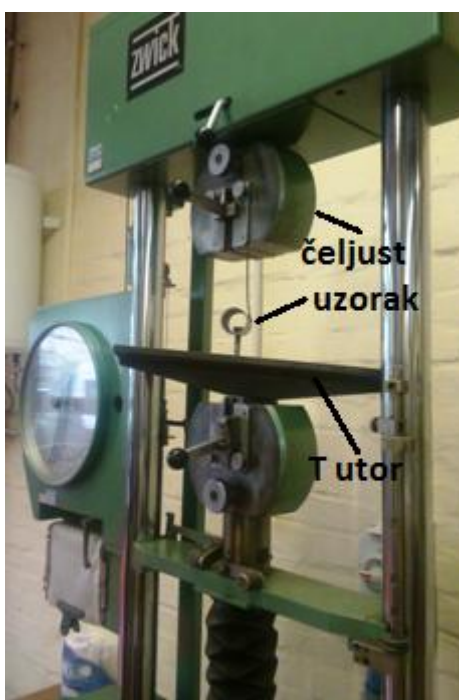
9.2.4. Smična proba

Nakon kontrole savijanjem, po 4 komada od svakog uzorka ispitani su smičnom probom prema HRN EN ISO 14273:2002 [33]. Smična proba obavila se na kidalici za koju je izrađena posebna naprava. Naprava se sastoji od čeljusti za prihvatač žice te ima T utor za prihvatač vijka koji pridržava sklop žica-cijev. Na slici 47 prikazan je uzorak pripremljen za smičnu probu. Vidljivo je da uzorak ima jedan kraj žice na sebi te provrt na drugoj strani cijevi gdje se umetne vijak.



Slika 47. Uzorak pripremljen za smičnu probu [19]

Na slici 48 prikazano je ispitivanje uzorka smičnom probom na kidalici.



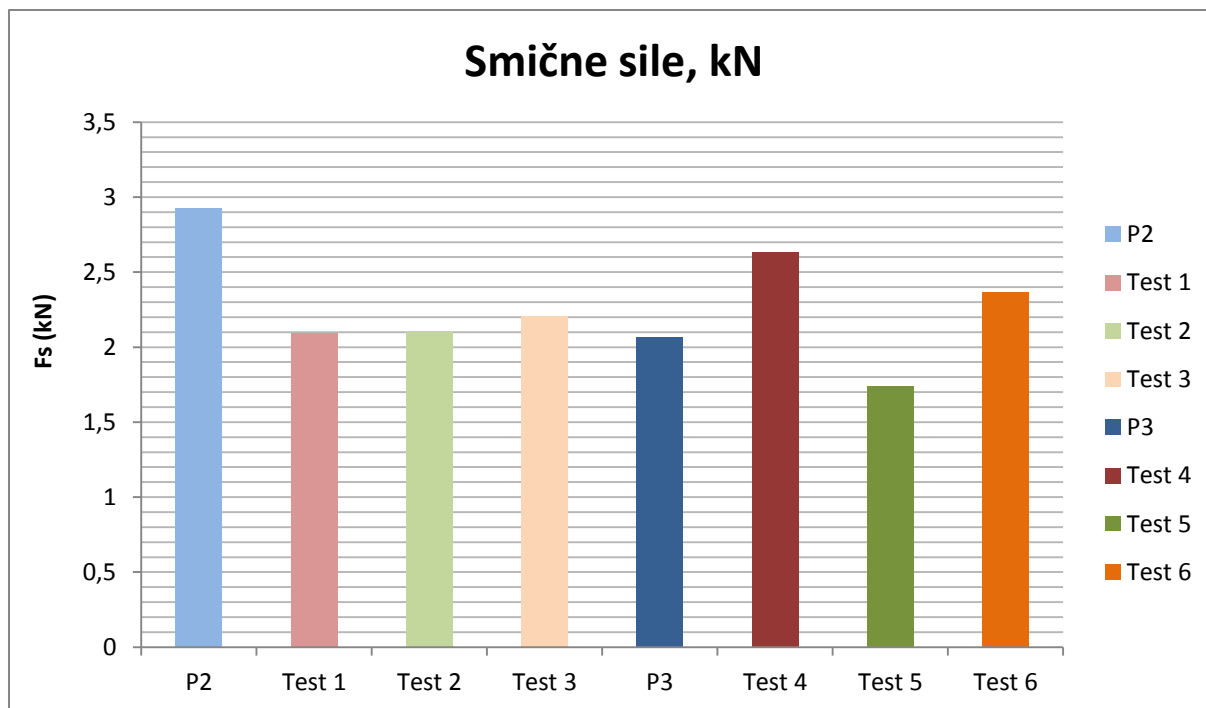
Slika 48. Ispitivanje uzorka smičnom probom [19]

U tablici 7 prikazani su rezultati mjerenja sile kod smične probe za svih 8 uzoraka (uključujući P2 i P3).

Tablica 7. Rezultati ispitivanja smične probe

Uzorak	Smična sila, F_s (kN)	Srednja vrijednost – F_s (kN)/ standardno odstupanje	Vrsta loma (zavar/ZUT)
P2	3,05/2,75/2,77/3,13	2,93/0,19	ZUT/ZUT/ZUT/ZUT
Test 1	2,8/2,01/1,69/1,84	2,09/0,50	zavar/zavar/zavar/zavar
Test 2	2,11/1,92/1,88/2,47	2,10/0,27	zavar/zavar/zavar/zavar
Test 3	2,36/1,91/2,22/2,35	2,21/0,21	zavar/zavar/zavar/zavar
P3	2,52/1,96/1,99/1,82	2,07/0,31	ZUT/zavar/zavar/zavar
Test 4	2,13/2,65/2,89/2,83	2,63/0,35	zavar/zavar/ZUT/ZUT
Test 5	2,06/1,63/1,84/1,43	1,74/0,27	zavar/zavar/zavar/zavar
Test 6	2,8/2,5/2,27/1,93	2,37/0,36	zavar/zavar/zavar/zavar

Na slici 49 grafički su prikazani rezultati ispitivanja smičnom probom.



Slika 49. Rezultati ispitivanja smične probe

Vidljivo je kako uzorci test 1, test 2 i test 3 imaju poprilično ujednačene vrijednosti, barem u odnosu na vrijednosti uzoraka test 4, test 5 i test 6. Dok je kod uzoraka test 4, test 5 i test 6 ista jakost struje, kod test 1, test 2 i test 3 jakost struje varira. Iz toga se može zaključiti da sa sniženjem vlačne čvrstoće više raste utjecaj vremena trajanja impulsa zavarivanja. Iako uzorci test 1 i test 3 imaju manju vrijednost smične sile od uzorka P2, oba zadovoljavaju po tom kriteriju, uz značajno kraće ukupno vrijeme zavarivanja. Uzorci test 4 i test 6 imaju veće vrijednosti smične sile od uzorka P3 te također zadovoljavaju. Iz ovoga se može zaključiti da je za optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava i vizualne prihvatljivosti moguće ili jednoimpulsno ili troimpulsno zavarivanje što će se pokazati i kroz probu čupanja.

9.2.5. Proba čupanja

Nakon smične probe obavljena je i proba čupanja s normalnim naprežanjem. Ispitana su po 4 komada od svakog uzorka prema normi ISO 14270 [34]. Proba čupanja obavila se na kidalici uz pomoć posebne naprave koja ima utor u obliku prizme za prihvat vijka. Prema HRN EN ISO 15614-12:2007 i HRN EN ISO 10447:2008, proba čupanja se izvodi ručno uz pomoć kliješta gdje se kliještima uhvati kraj žice i žica se savija oko kliješta prema zavaru te se čupa [26,35]. Nakon takvog testa moguće je izmjeriti dimenzije zavara, odnosno omjer maksimalnog i minimalnog promjera zavara. Kod mehanizirane probe čupanja koja se

izvodila u ovom eksperimentalnom radu, moguće je odrediti i normalnu silu potrebnu da se žica iščupa s cijevi. Na slici 50 prikazan je jedan od uzoraka pripremljen za mehaniziranu probu čupanja.



Slika 50. Uzorak pripremljen za mehaniziranu probu čupanja [19]

Vidljivo je kako uzorak ima provrt sa suprotne strane cijevi u odnosu na ispitivani zavar koji će poslužiti za umetanje vijka. Žica je pažljivo savijana pomoću dva para kliješta i to tako da se ne ošteti u ZUT-u što bi rezultiralo smanjenom silom čupanja i nerealnim podacima. Na slici 51 prikazano je ispitivanje probom čupanja.



Slika 51. Ispitivanje probom čupanja [19]

U tablici 8 prikazani su rezultati probe čupanja, dok su u tablici 9 prikazani podaci mjerenja dimenzija zavara nakon obavljene probe čupanja.

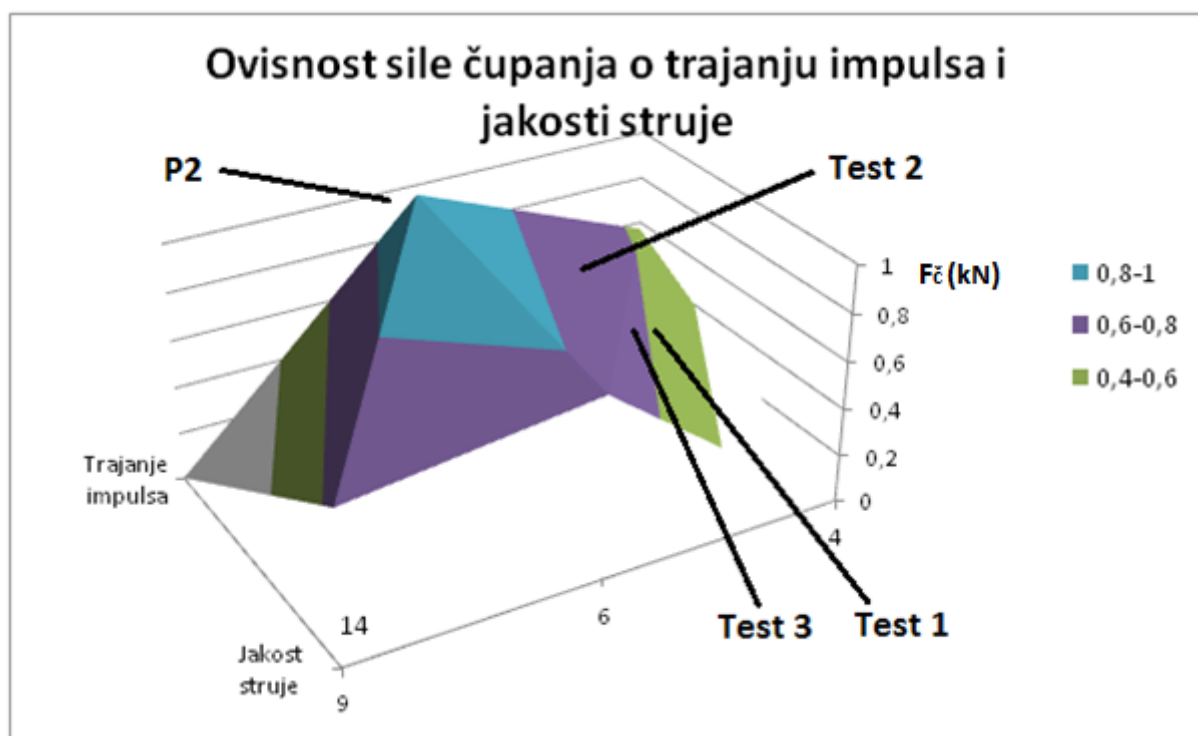
Tablica 8. Rezultati ispitivanja probe čupanjem

Uzorak	Sila čupanja F_c (kN)	Srednja vrijednost – F_c (kN)	Standardno odstupanje
P2	0,83/0,75/1,47/0,79	0,96	0,34
Test 1	0,69/0,49/0,41/0,68	0,57	0,14
Test 2	0,74/0,69/0,82/0,78	0,76	0,06
Test 3	0,62/0,55/0,57/0,81	0,64	0,12
P3	0,82/1,41/0,54/0,74	0,88	0,34
Test 4	0,62/1,26/0,64/0,86	0,85	0,30
Test 5	1,06/0,54/0,52/0,99	0,78	0,29
Test 6	1,25/0,44/0,83/0,77	0,82	0,33

Tablica 9. Rezultati mjerenja dimenzija zavora nakon probe čupanja

Uzorak	Promjer zavora (mm)			Srednja vrijednost/standardno odstupanje – d_s (mm)	Omjer max. i min. promjera zavora	Vrsta loma
	d_2	d_1	d_s			
P2	4,0/4,0/3,9/4,0	3,2/2,5/3,1/2,8	3,6/3,25/3,5/3,4	3,44/0,15	1,25/1,6/1,26/1,4	asimetričan
Test 1	4,5/4,7/4,4/4,3	2,5/2,4/2,2/2,3	3,5/3,5/3,3/3,3	3,41/0,13	1,8/1,96/2/1,87	asimetričan
Test 2	4,0/4,6/4,4/4,5	2,7/2,8/3,0/3,1	3,35/3,7/3,7/3,8	3,64/0,2	1,5/1,64/1,47/1,45	asimetričan
Test 3	3,8/3,7/3,9/3,9	2,2/2,0/2,4/2,6	3/2,85/3,15/3,25	3,06/0,18	1,73/1,85/1,6/1,5	asimetričan
P3	3,6/3,6/4,1/3,9	2,5/2,7/2,8/2,9	3,05/3,15/3,45/3,5	3,29/0,22	1,44/1,3/1,46/1,3	asimetričan
Test 4	4,8/4,4/4,5/4,7	2,3/2,4/2,2/2,3	3,5/3,4/3,35/3,5	3,44/0,09	2,1/1,83/2,05/2,1	asimetričan
Test 5	4,3/4,1/4,5/4,1	2,4/2,3/2,6/2,1	3,35/3,2/3,5/3,1	3,29/0,2	1,8/1,8/1,73/1,95	asimetričan
Test 6	4,2/3,8/4,1/4,2	2,2/2,3/2,4/2,1	3,2/3,05/3,25/3,15	3,16/0,09	1,9/1,65/1,7/2	asimetričan

Na slici 52 grafički je prikazana ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa te jakosti struje za P2, test 1, test 2 i test 3.

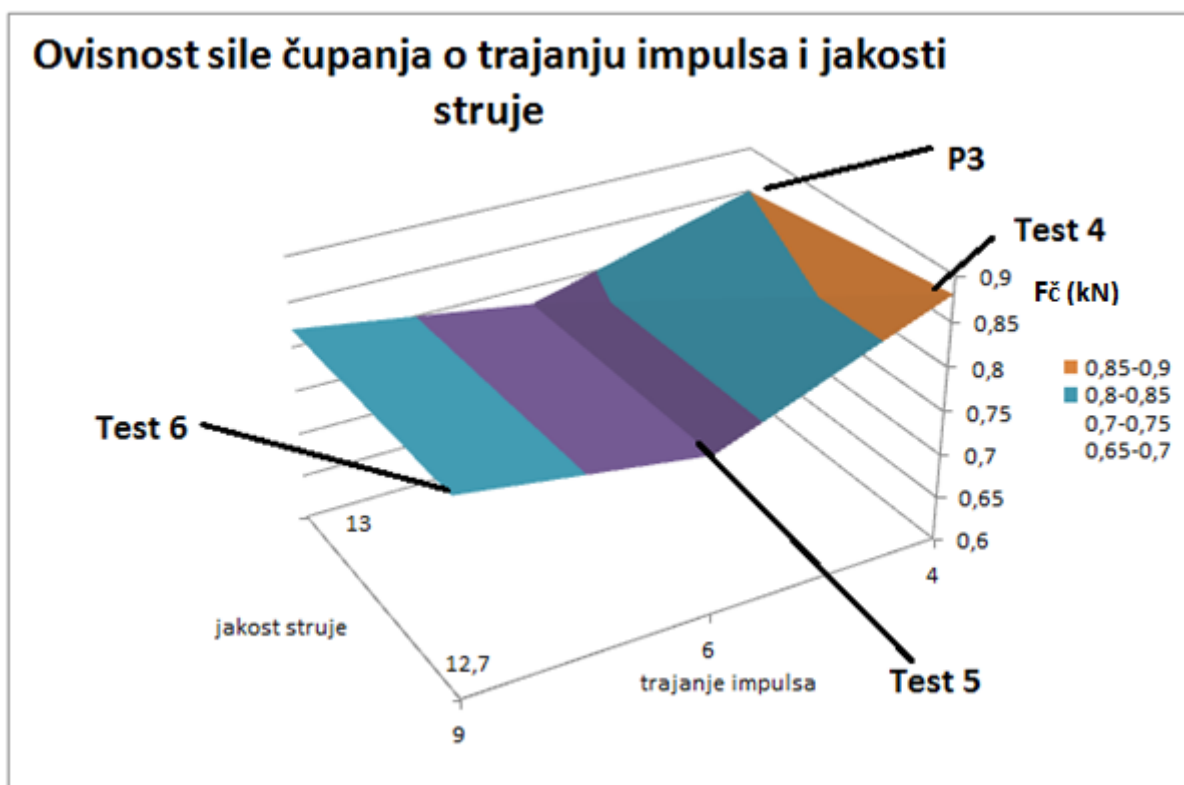


Slika 52. Ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa i jakosti struje za P2, test 1, test 2 i test 3

Sa slike 52 je vidljivo da je plavo obojano područje (uzorak P2) najbolje što se tiče sile čupanja. Međutim, kako je jedan od ciljeva rada smanjiti cjelokupno vrijeme zavarivanja,

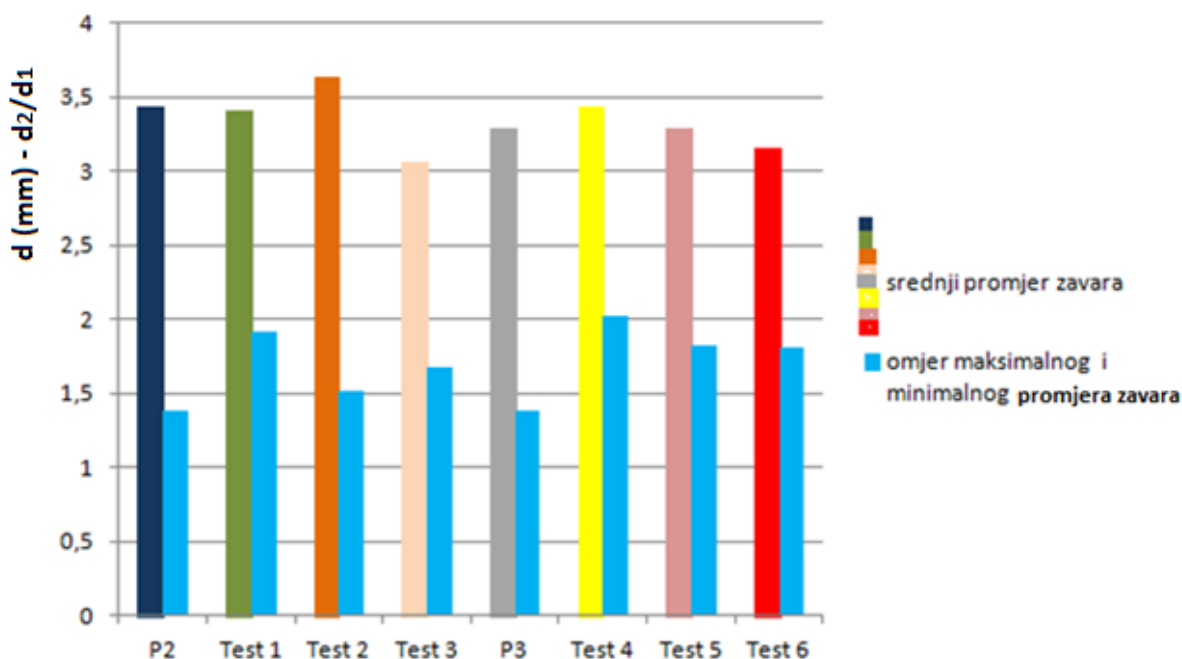
potrebno je uzeti u obzir druga područja. Ljubičasto područje je područje uzoraka test 2 i test 3, a prijelaz između ljubičastog i zelenog je područje uzoraka test 1. Kako je test 2 eliminiran radi vizualnog neprihvatanja, u obzir dolaze test 1 i test 3. Dakle, za ostvariti dobru kombinaciju vremena zavarivanja i vrijednosti sile čupanja, potrebno se bazirati na jednoimpulsno ili troimpulsnom zavarivanju, uz primjereno povećanje vrijednosti trajanja impulsa i jakosti struje za jednoimpulsno zavarivanje (tablica 3).

Na slici 53 grafički je prikazana ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa te jakosti struje za P3, test 4, test 5 i test 6.



Slika 53. ovisnost vrijednosti sile čupanja F_c o trajanju impulsa te jakosti struje za P3, test 4, test 5 i test 6

Sa slike 53 je vidljiva obrnuta situacija u odnosu na povezanost sile čupanja i parametara uzoraka P2, test 1, test 2 i test 3. Naime, u ovom slučaju vrijednosti sile čupanja su niže za srednju vrijednost trajanja impulsa što je i vidljivo na području parametara koje je najniže u sredini (ljubičasto područje). Za ovaj slučaj u obzir dolaze plavo i narančasto obojena područja, odnosno parametri uzoraka test 4 i test 6. Iako i parametri za P3 spadaju u plavo područje, prednost imaju test 4 i 6 radi kraćeg ukupnog vremena zavarivanja. Na grafikonu na slici 54 prikazane su dimenzije srednjih promjera zavara te omjeri maksimalnog i minimalnog promjera zavara za sve uzorke.

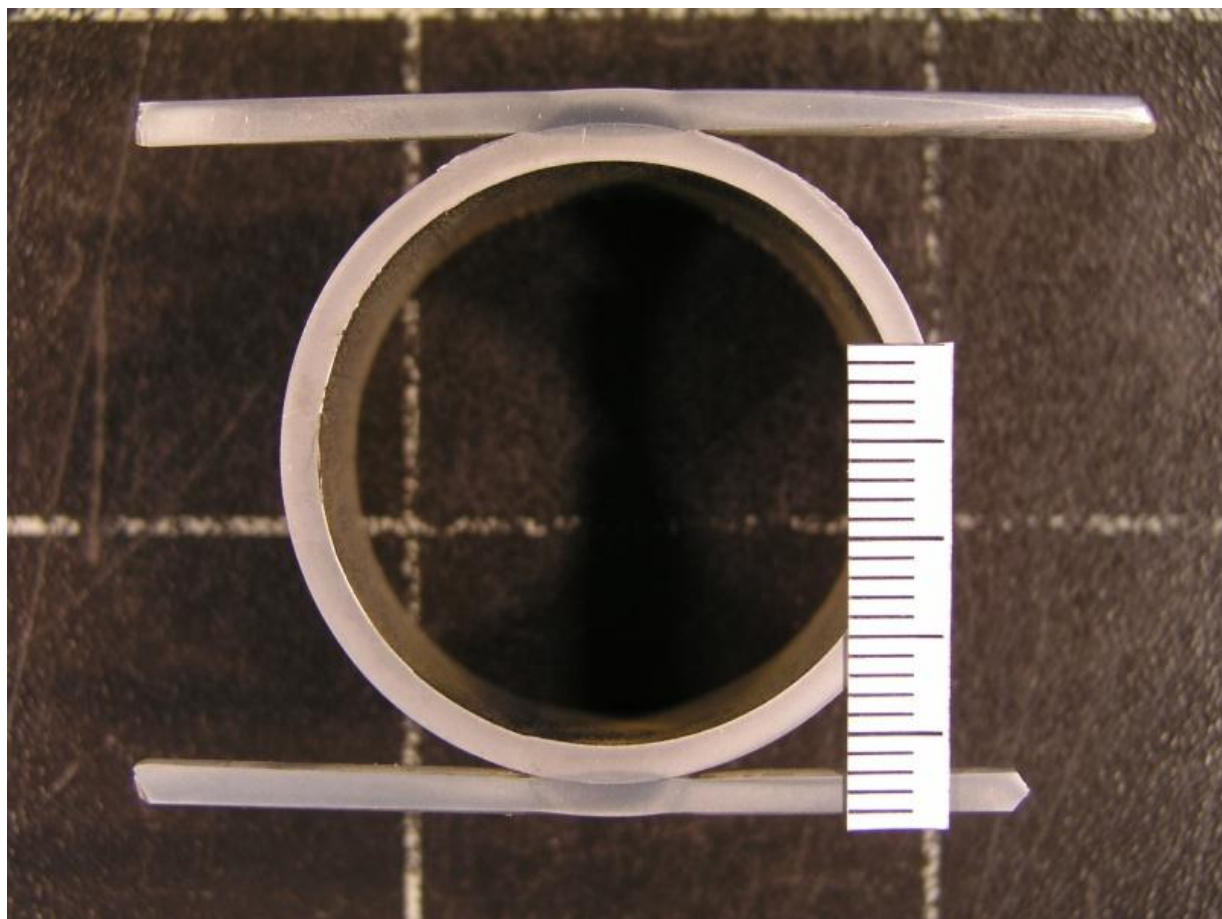


Slika 54. Dimenzije srednjih promjera zavora te omjeri maksimalnih i minimalnih promjera zavora za sve uzorke

Iz grafikona na slici 54 vidljivo je da uzorci sa žicom manje vlačne čvrstoće (P3, test 4, test 5, test 6) imaju veće vrijednosti omjera maksimalnog i minimalnog promjera zavora u odnosu na uzorke sa žicom veće vlačne čvrstoće (P2, test 1, test 2, test 3) što upućuje da ostavljaju uži otisak zavora nakon čupanja i samim tim je potrebna veća sila da se žica iščupa s cijevi. Iz toga se može zaključiti da su žice s većom vrijednosti vlačne čvrstoće sklonije pojavi naljepljivanja (slaba penetracija te širok otisak zavora) i za njih bi trebalo dodatno korigirati parametre zavarivanja. Vrijednosti srednjeg promjera zavora (d) ne razlikuju se značajno među uzorcima.

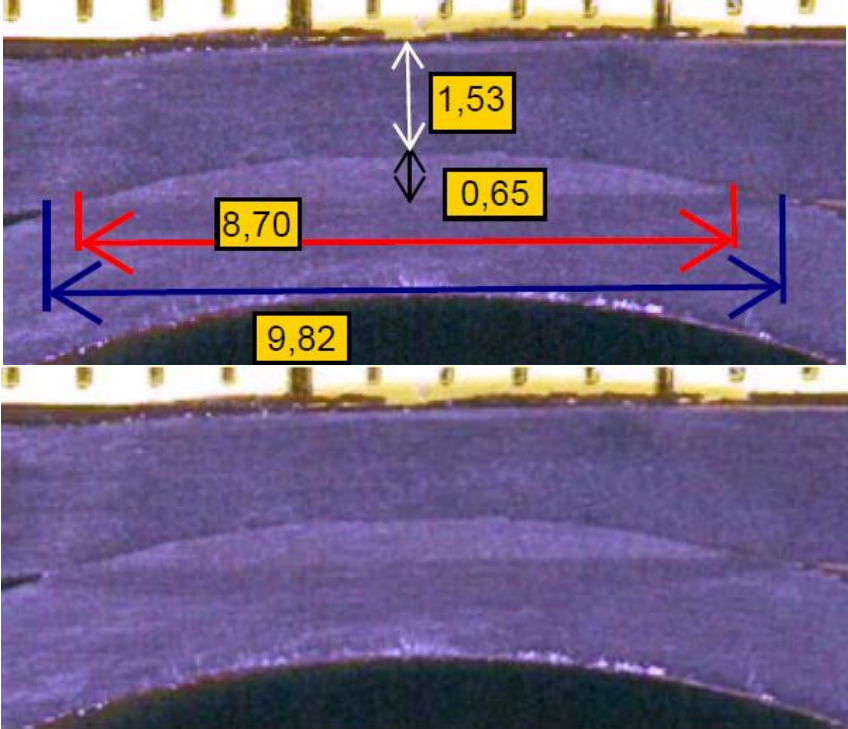
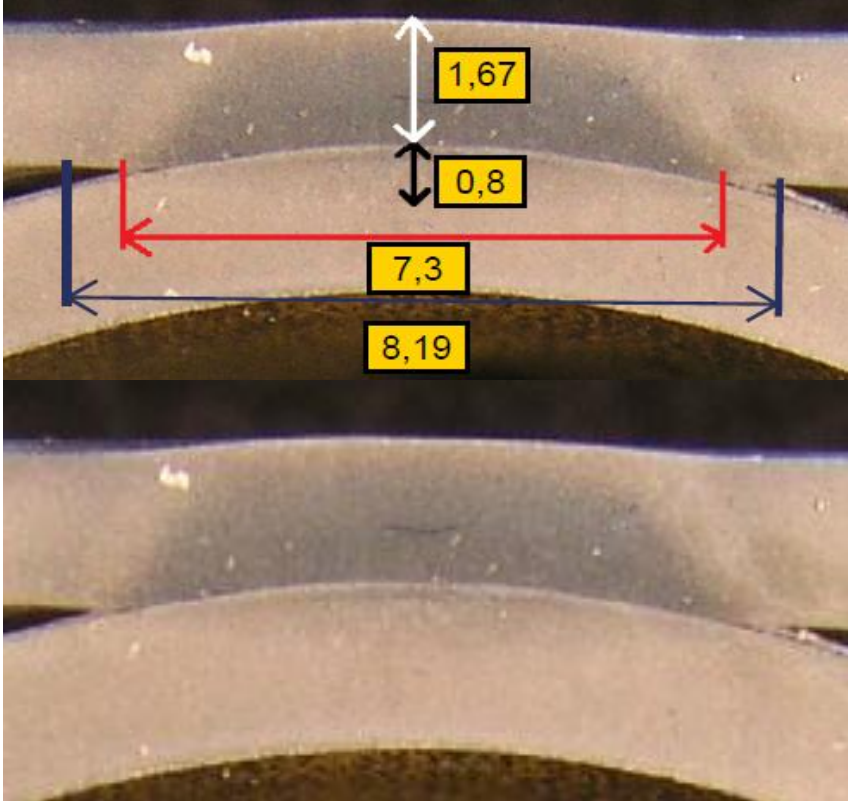
9.2.6. Analiza makroizbrusaka

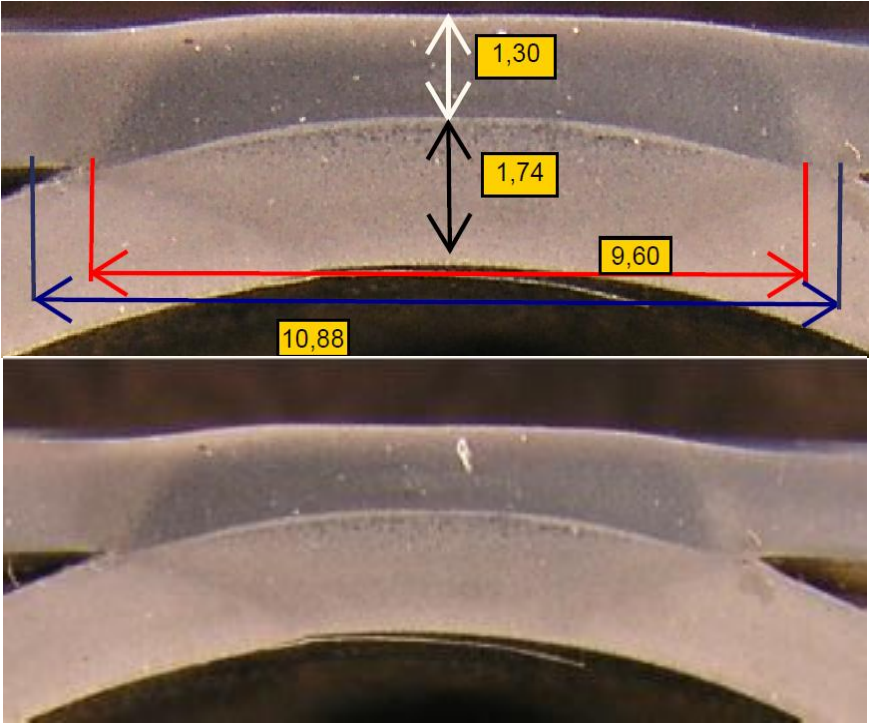
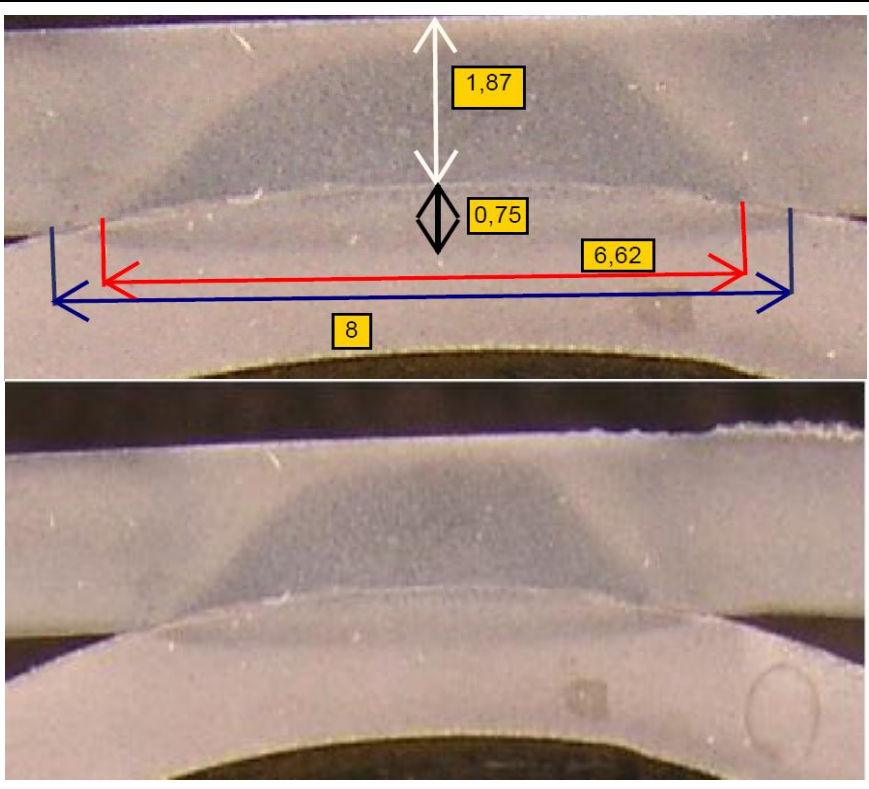
Osam različitih sklopova žica-cijev bili su podvrgnuti geometrijskoj analizi makroizbrusaka zavarenih spojeva. Uzorci su pripremljeni u skladu s HRN EN ISO 17639:2013 [36]. Nakon rezanja, brušeni su papirima različitih veličina zrnatosti, od 320 do 4000 te su nakon toga nagriženi u sredstvu za nagrizanje prema HRN CR 12361:1999 A.1 (nital 3 %) [37]. Slika 55 prikazuje makroizbrusak jednog od uzoraka dok su u tablicama 10 i 11 prikazani svi makroizbrusci te geometrijske značajke zavora.



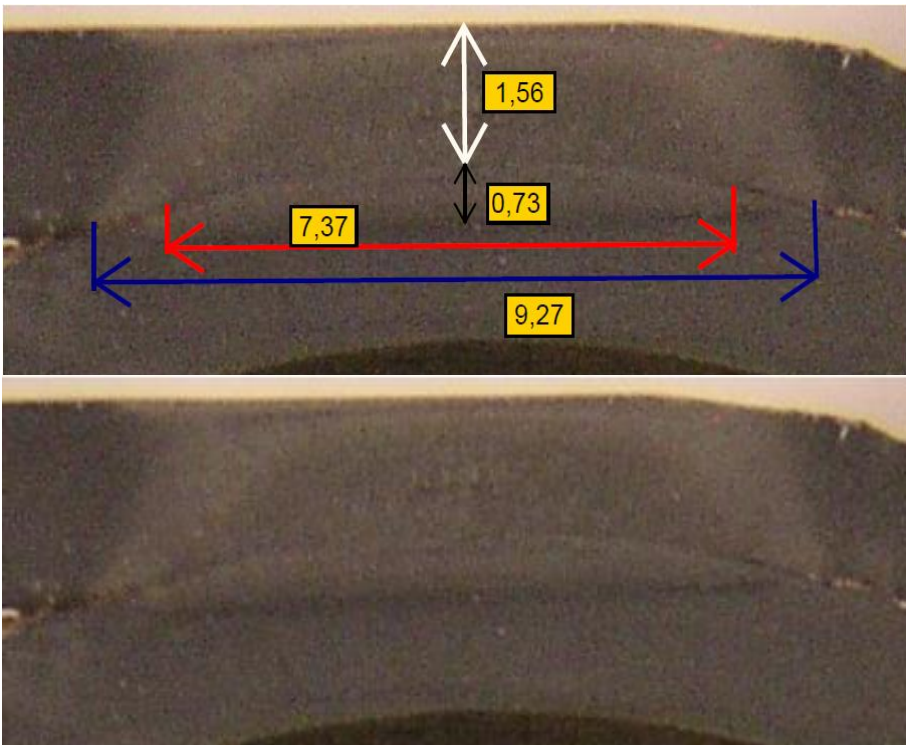
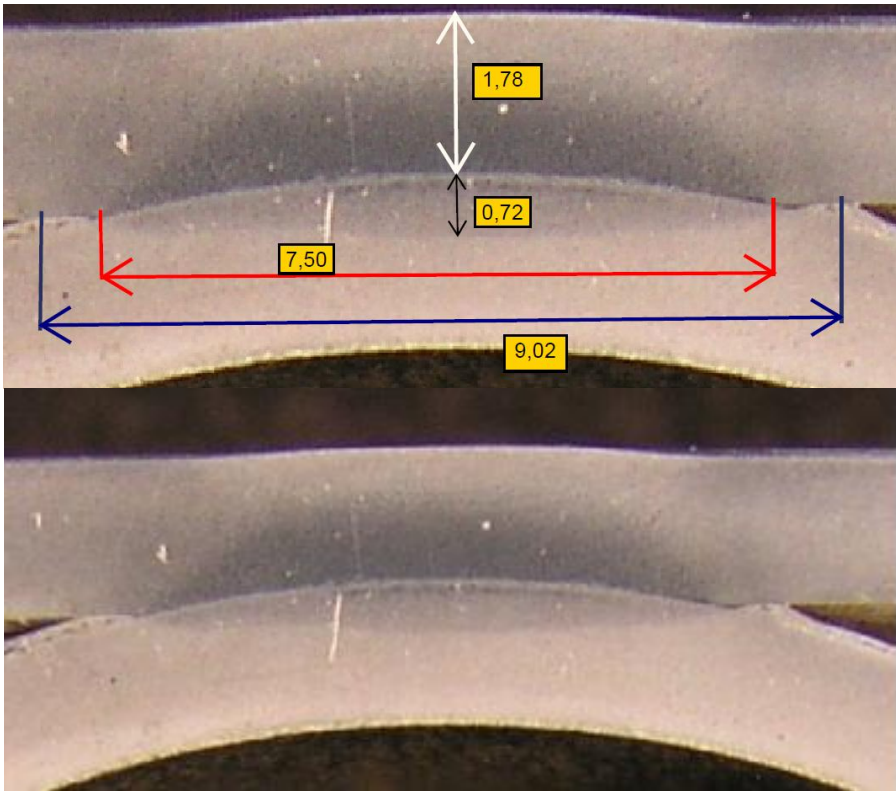
Slika 55. Makroizbrusak uzorka test 4 [19]

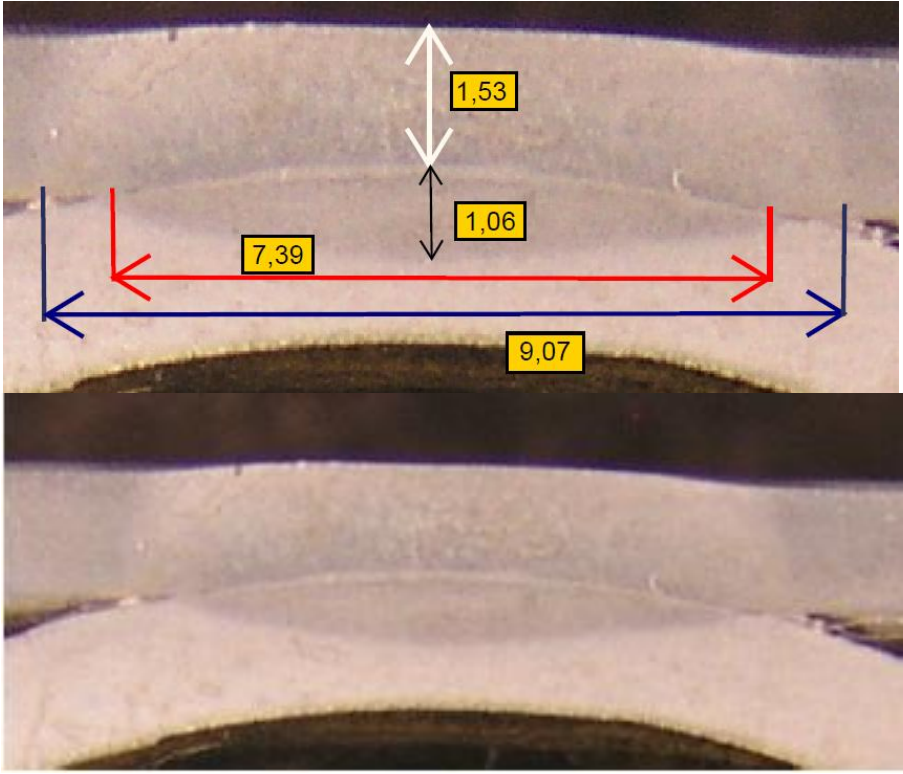
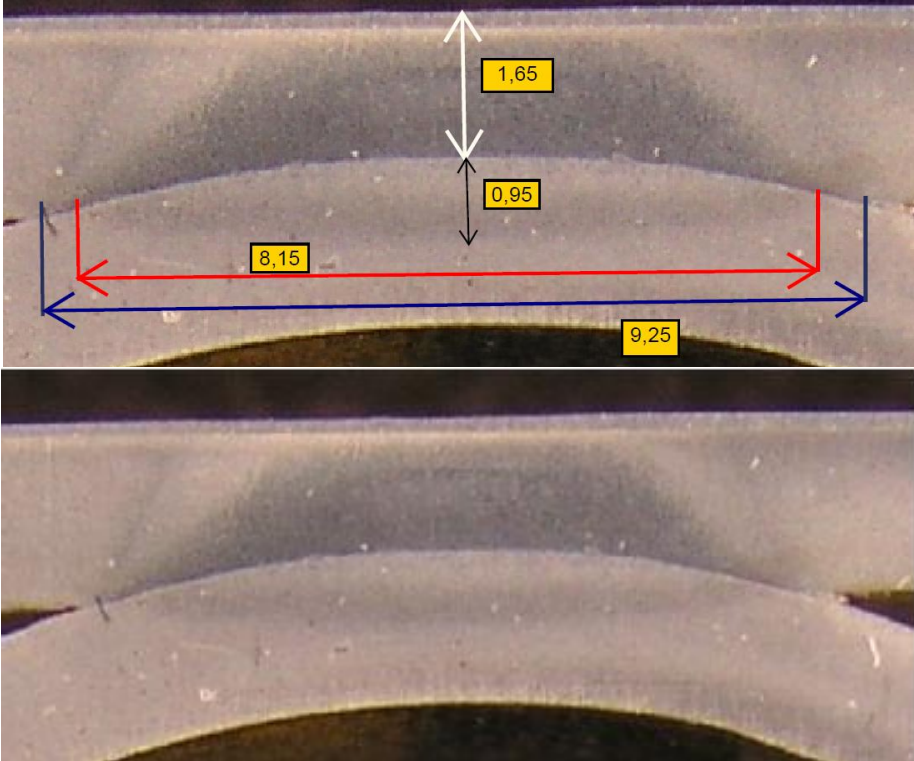
Tablica 10. Geometrijska analiza makroizbrusaka uzoraka P2, test 1, test 2 i test 3

Uzorak	Makroizbrusak
P2	
Test 1	

Test 2	 <p>Micrograph showing a curved surface with dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none">Vertical distance (white double-headed arrow): 1,30Vertical distance (black double-headed arrow): 1,74Horizontal distance (red double-headed arrow): 9,60Horizontal distance (blue double-headed arrow): 10,88
Test 3	 <p>Micrograph showing a curved surface with dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none">Vertical distance (white double-headed arrow): 1,87Vertical distance (black double-headed arrow): 0,75Horizontal distance (red double-headed arrow): 6,62Horizontal distance (blue double-headed arrow): 8

Tablica 11. Geometrijska analiza makroizbrusaka uzoraka P3, test 4, test 5 i test 6

Uzorak	Makroizbrusak
P3	
Test 4	

Test 5	 <p>Diagram showing weld geometry for Test 5. The weld is a semi-circular butt joint. Dimensions are indicated by arrows and labeled in yellow boxes: a vertical arrow from the top surface to the weld crown is 1,53; a vertical arrow from the weld crown to the root is 1,06; a horizontal red arrow from the weld toe to the weld crown is 7,39; a horizontal blue arrow from the weld toe to the weld crown is 9,07.</p>
Test 6	 <p>Diagram showing weld geometry for Test 6. The weld is a semi-circular butt joint. Dimensions are indicated by arrows and labeled in yellow boxes: a vertical arrow from the top surface to the weld crown is 1,65; a vertical arrow from the weld crown to the root is 0,95; a horizontal red arrow from the weld toe to the weld crown is 8,15; a horizontal blue arrow from the weld toe to the weld crown is 9,25.</p>

U tablici 12 izdvojene su geometrijske značajke zavora radi boljeg pregleda.

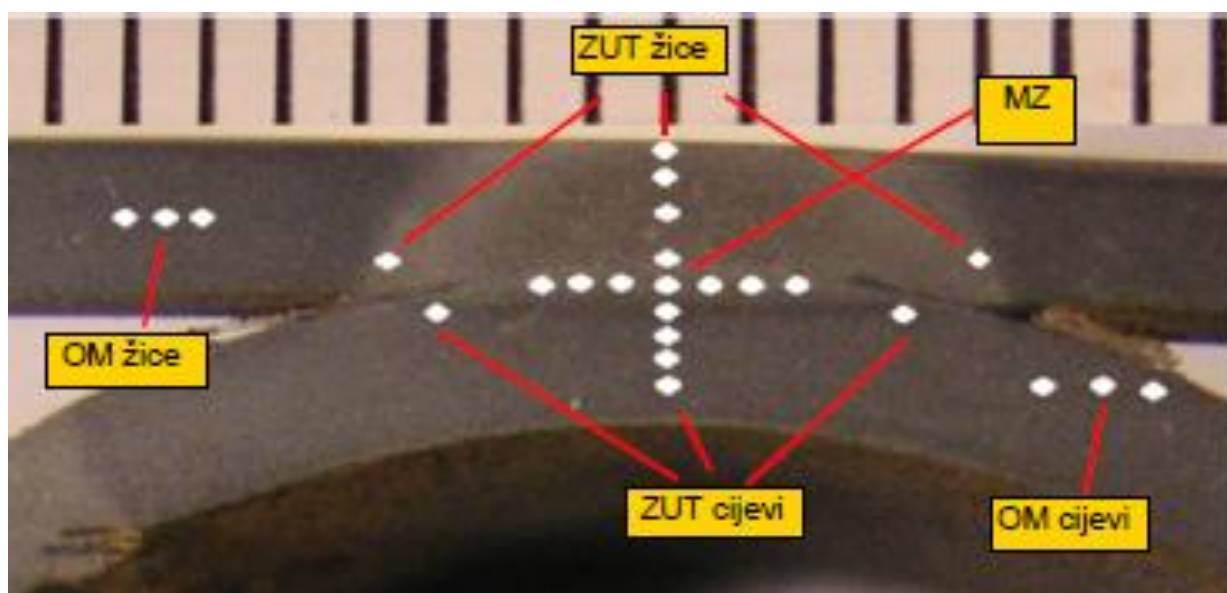
Tablica 12. Geometrijske značajke uzoraka

Uzorci	P2	Test 1	Test 2	Test 3	P3	Test 4	Test 5	Test 6
Promjer žice (mm)	1,53	1,67	1,3	1,87	1,56	1,78	1,53	1,65
Penetracija u materijal cijevi (mm)	0,65	0,8	1,74	0,75	0,73	0,72	1,06	0,95
Maksimalna širina jezgre zavara (mm)	8,7	7,3	9,6	6,62	7,37	7,5	7,39	8,15
Maksimalna širina ZUT-a (mm)	5,47	4,54	6,08	4,69	5,58	5,27	5,37	5,17

Iz tablice 12 vidljivo je da uzorak test 3 ima najmanje staljenu žicu te samim timu jako malu penetraciju u materijal cijevi, što se pretpostavljalo tijekom vizualnog pregleda uzoraka. Međutim, mala vrijednost penetracije ne mora nužno značiti i malu silu čupanja. Uzorak test 3 ima manju penetraciju od uzorka test 1, ali ima veću vrijednost sile čupanja. U slučaju uzorka test 2 vizualni izgled zavara itekako ovisi o vrijednostima penetracije, promjera žice te širine jezgre zavara i ZUT-a. Uzorak test 2 ima najveće vrijednosti od svih uzoraka i može se zaključiti da je u tom slučaju previsoki unos topline. Rezultati ostalih uzoraka ne odskaku značajno međusobno te u odnosu na uzorke P2 i P3. Također je vidljivo da uzorci sa žicom s manjom vlačnom čvrstoćom imaju ujednačenije dimenzije širina jezgre zavara i ZUT-a što se može povezati s rezultatima dimenzija srednjih promjera zavara gdje je ista situacija.

9.2.7. Ispitivanje tvrdoće

Nakon obavljene analize makroizbrusaka zavara, isti uzorci bili su podvrgnuti ispitivanju tvrdoće. Tvrdoća se mjerila metodom HV1 prema HRN EN ISO 14271:2011 [38]. Na slici 56 prikazana su mjesta na makroizbruscima gdje se mjerila tvrdoća (označena su bijelim točkama). Na slici je vidljivo kako se tvrdoća mjerila u osnovnom materijalu, ZUT-u te metalu zavara.



Slika 56. Pozicije na makroizbrusku sklopa žica-cijev za mjerenje tvrdoće [19]

U tablicama 13 i 14 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoća za sve uzorke. Oznaka OM označava osnovni metal, ZUT označava zonu utjecaja topline te MZ označava metal zavara.

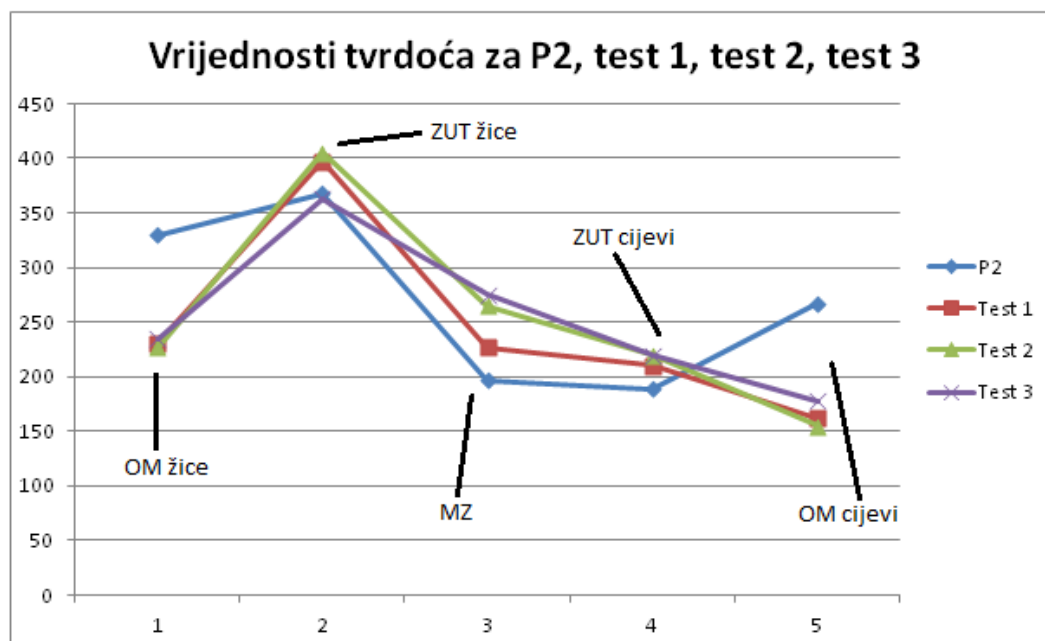
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorke P2, test 1, test 2 i test 3

Uzorci	Izmjerene tvrdoće po rasporedu mjerenja (HV)				
P2	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	305	358	197	159	224
	323	368	195	189	267
	330	348	185	153	234
		224	193	167	
		312	197	185	
			185		
			178		
			193		
			191		
Test 1	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	231	256	215	193	154
	226	270	220	210	161
	192	389	220	187	162
		397	227	185	
		360	226	189	
			221		
			215		
			209		
			213		
Test 2	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	227	346	265	215	153
	220	341	239	207	155
	219	405	225	212	151
		397	206	220	
		375	212	195	
			217		
			221		
			240		
			202		
Test 3	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	195	260	275	182	160
	226	235	206	210	178
	235	320	210	215	166
		345	214	220	
		363	220	218	
			205		
			219		
			217		
			233		

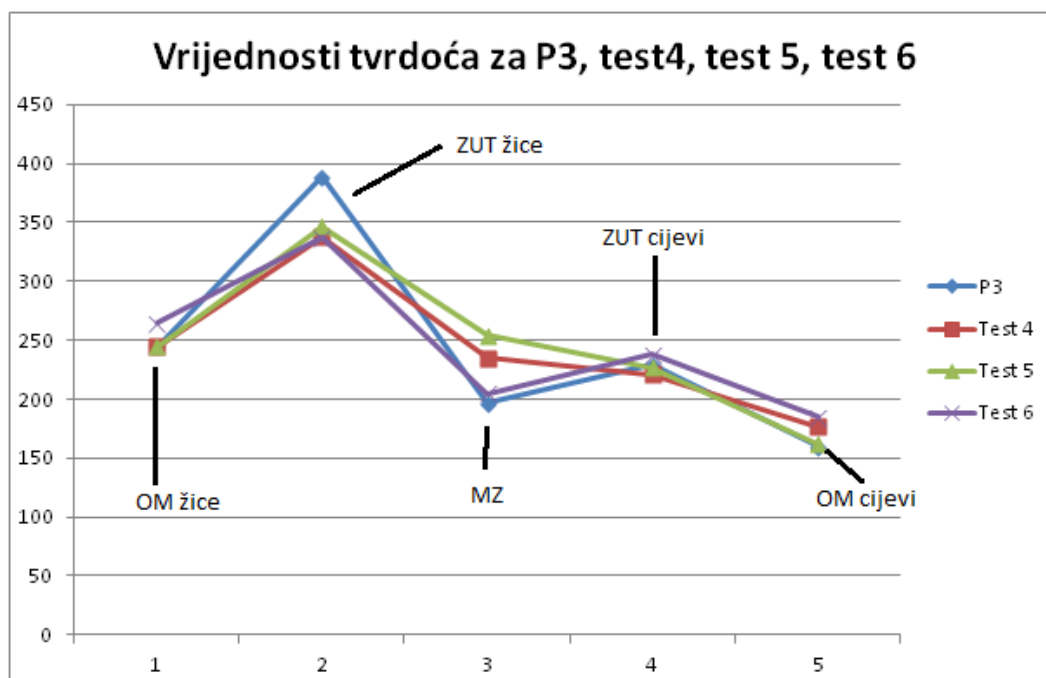
Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorke P3, test 4, test 5 i test 6

Uzorci	Izmjerene tvrdoće po rasporedu mjerenja (HV)				
P3	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	234	389	185	229	153
	224	368	189	201	151
	245	313	191	189	160
		358	197	185	
		368	193	191	
			199		
			193		
			189		
Test 4	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	235	338	226	221	177
	245	280	205	219	167
	225	316	210	220	160
		325	230	215	
		315	225	208	
			214		
			235		
			221		
Test 5	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	245	306	254	217	162
	230	290	221	205	157
	221	330	215	227	156
		341	220	226	
		347	239	219	
			235		
			228		
			230		
Test 6	OM-žica	ZUT-žica	MZ	ZUT-cijev	OM-cijev
	265	337	185	205	185
	252	305	205	238	171
	255	325	195	207	165
		323	201	193	
		325	205	202	
			190		
			193		
			202		
Test 6			201		

U grafikonima na slikama 57 i 58 prikazano je kretanje maksimalnih izmjerenih tvrdoća po segmentima poprečnih presjeka sklopova žica-cijevi.



Slika 57. Vrijednosti tvrdoća za uzorke P2, test 1, test 2 i test 3



Slika 58. Vrijednosti tvrdoća za uzorke P3, test 4, test 5 i test 6

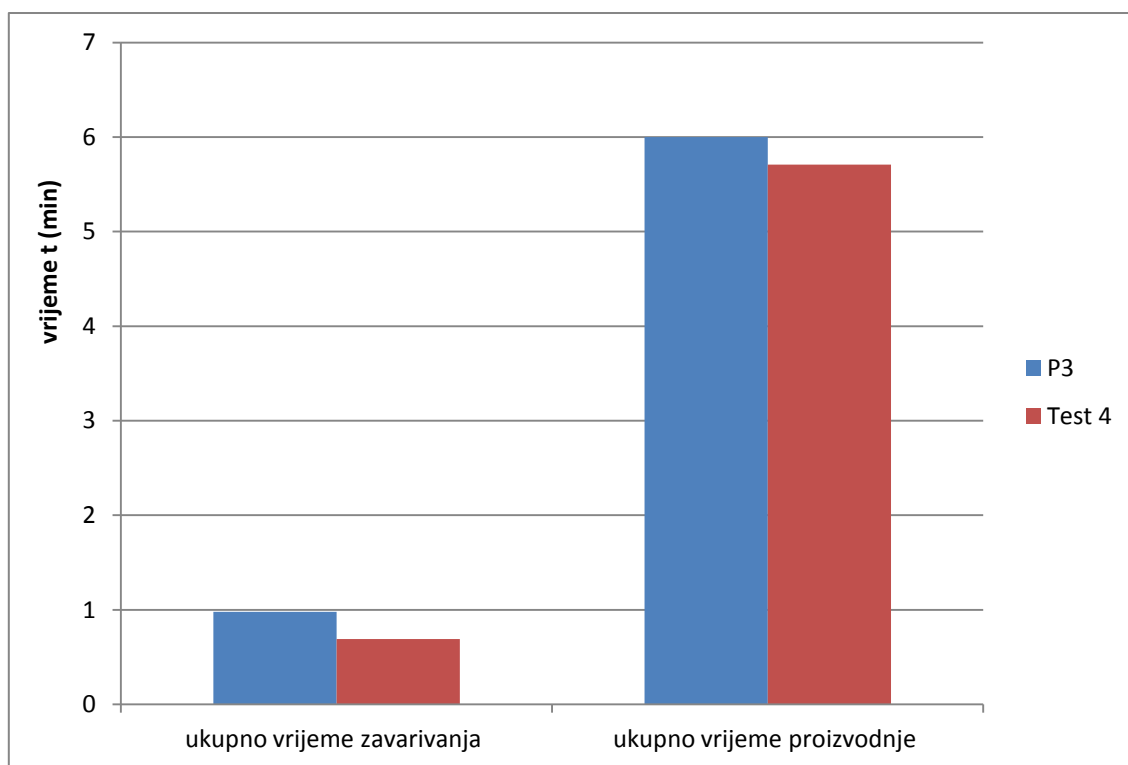
Iz grafikona sa slika 57 i 58 vidljiva je razlika tvrdoća uzoraka P2 i P3 spram ostalih uzoraka te veća ujednačenost tvrdoća uzoraka test 4, test 5 i test 6 u odnosu na test 1, test 2 i test 3. Međutim, ne radi se o značajnim razlikama te se može zaključiti da u zavarivanju sklopova žica-cijev nema velikih oscilacija tvrdoće. Naime, s jako kratkim vremenima zavarivanja teško može doći do značajnijih promjena mikrostrukture koja bi utjecala na promjenu mehaničkih svojstava.

9.3. Razrada rezultata ispitivanja

Kroz obavljena ispitivanja i konačne rezultate, uočeno je da svi uzorci osim uzorka test 2 zadovoljavaju zahtjeve vizualne prihvatljivosti. Nadalje, uzorci test 1, test 3, test 4, test 5 i test 6 zadovoljavaju kroz rezultate smične probe i probe čupanja. Jedino uzorak test 5 ima značajno manju vrijednost smične sile u odnosu na uzorke test 4 i test 6. Također se pokazalo da uzorci sa žicom veće vlačne čvrstoće (test 1, test 2, test 3) imaju manje vrijednosti omjera maksimalnog i minimalnog promjera zavora, a to upućuje na prisutnost problema naljepljivanja što se može očitati i iz rezultata probe čupanja. Za te uzorke svakako je potrebno daljnje korigiranje parametara te ispitivanja. Kad se sagledaju svi rezultati ispitivanja u korelaciji s ukupnim vremenima uzoraka u odnosu na uzorke P2 i P3, može se zaključiti da je moguće ostvariti cilj ovog rada, a to su povećanje proizvodnosti uz istovremeno zadržavanje prihvatljivih mehaničkih svojstava. Da bi se to ostvarilo, optimalno je koristiti jednoimpulsno te troimpulsno zavarivanje. Konkretno, radi se o parametrima uzoraka test 1 i test 3 (žica s većom vrijednosti vlačne čvrstoće) te test 4 i test 6 (žica s manjom vrijednosti vlačne čvrstoće). Te dvije grupe uzoraka razlikuju se u vrijednosti jakosti struje te u prisutnosti predgrijavanja. Da bi se dobili zajednički parametri koji bi i dalje garantirali vizualnu prihvatljivost i prihvatljiva mehanička svojstva, potrebno je pronaći kompromis između datih parametara. Više o tome bit će u poglavlju 9.3.2.

9.3.1. Utjecaj novih parametara na proizvodnost

Za primjer su uzeti parametri koji se trenutno koriste u proizvodnji (žica s manjom vlačnom čvrstoćom), a to su parametri uzorka P3. Kod uzorka P3 ukupno vrijeme zavarivanja iznosi 98 perioda, odnosno 58,8 sekundi. S tim vremenom zavarivanja moguće je dnevno proizvesti 200 cijevi, pošto se radi u dvije smjene po 10 sati. Ukupno vrijeme proizvodnje jedne cijevi je 6 minuta. To vrijeme sastoji se od ukupnog vremena zavarivanja koje traje 0,98 minuta te rukovanja i manipulacije elementima koje traje 5,02 minute. Ako bi se proizvodilo s parametrima uzorka test 4, ukupno vrijeme zavarivanja smanji se na 0,69 minuta, odnosno ukupno vrijeme proizvodnje jedne cijevi je 5,71 minuta. Na taj način, dnevno je moguće proizvesti 210 cijevi, odnosno 10 cijevi više, a godišnje 2800 cijevi više (ako se uzme u obzir da ima otprilike 280 radnih dana). Na slici 59 dana je grafička usporedba vremena proizvodnje i količine proizvoda.



Slika 59. Usporedba vremena zavarivanja i proizvodnje za uzorke P3 i test 4

Sa slike 59 vidi se da nije značajna razlika u vremenima zavarivanja i proizvodnje jedne cijevi, što je posljedica dugog vremena rukovanja elementima sklopa žica-cijev. Međutim, povećanje od 10 cijevi dnevno je dobar rezultat. Vremena rukovanja elementima (namještanje proizvoda u šablonu, stezanje šablone, itd.) može se skratiti uvođenjem, primjerice automata koji će dodavati žicu ili pak manipulatora koji bi umetao cijevi u šablonu. Na taj način značajnije bi se povećala proizvodnost te smanjio broj potrebnih radnika.

9.3.2. Prijedlog daljnjeg istraživanja

Kroz rezultate ispitivanja uočeno je da je i dalje prisutan problem naljepljivanja, barem kad se radi o zavarivanju uzoraka gdje se koristi žica s većom vrijednosti vlačne čvrstoće. Potrebno je daljnje korigiranje parametara za uzorke test 1 i test 3, odnosno dobro bi bilo istraživanje provesti kroz dulje razdoblje te koristiti više uzoraka gdje bi se moglo preciznije korigirati parametre te samim tim dati preciznije i korisnije zaključke o utjecaju parametara zavarivanja. Kad bi se na taj način dobili novi parametri za spomenute uzorke, bilo bi moguće naći kompromis između novih parametara te parametara uzoraka test 4 i test 6, odnosno naći parametre koji će garantirati dobra svojstva za proizvode s obe vrste žica. Također, potrebno je uvesti i dinamička ispitivanja koja bi dala realniji uvid u ponašanje proizvoda u daljnoj eksploataciji pošto statički pokusi ne mogu dati toliko realan uvid u svojstva materijala u korelaciji s uvjetima eksploatacije. Primjerice, moguće je uzorak montirati na elektromotor tako da žica određenom frekvencijom udara u kruti predmet. Naposljetku, dobro bi bilo istražiti i utjecaj automata za dodavanje žice/cijevi na kvalitetu zavora, ako ga se uvede u proizvodnju.

10. ZAKLJUČAK

Nakon detaljnog opisivanja svih značajki bradavičastog elektrootpornog zavarivanja obavljena su i različita ispitivanja uzoraka s ciljem otkrivanja utjecaja parametara zavarivanja na razlike u mehaničkim svojstvima i vizualnom izgledu uzoraka. Za to je potrebno široko znanje o svim elementima koji utječu na elektrootporno zavarivanje. Postoji puno parametara koji utječu na kvalitetu zavarenog spoja ne samo pojedinačno već i međusobno. Krivo podešenje jednog parametra može utjecati i na nekoliko drugih parametara.

Rezultati ispitivanja pokazali su da je moguće istovremeno povećati proizvodnost te zadržati prihvatljiva mehanička svojstva. Pokazalo se da najbolju kombinaciju vizualnog izgleda i mehaničkih svojstava imaju uzorci s jednoimpulsnim te troimpulsnim zavarivanjem, uz otprilike jednake iznose jakosti struja. Jedina bitnija razlika je predgrijavanje koje je potrebno za zavarivanje uzoraka sa žicom koja ima veće vrijednosti vlačne čvrstoće. Uzorci sa žicom veće vlačne čvrstoće (test 1 i test 3) u odnosu na referentni uzorak (P2) imaju slabija mehanička svojstva za otprilike 30 %, ali imaju i kraće vrijeme zavarivanja za isti iznos te njihovi parametri spadaju u područje prihvatljivih za daljnju proizvodnju. Ipak, parametre tih uzoraka potrebno je dodatno korigirati te nove uzorke ispitati kako bi se utvrdila još bolja mehanička svojstva, veća proizvodnost te eliminiralo pojavu naljepljivanja. Uzorci sa žicom manje vlačne čvrstoće (test 4 i test 6) u odnosu na referentni uzorak (P3) imaju slična mehanička svojstva (otprilike ista potrebna sila čupanja i za 20 % veća potrebna smična sila) te vrijeme zavarivanja koje je kraće za otprilike 30 %. Kod tih uzoraka nema pojave naljepljivanja te njihovi parametri spadaju u područje prihvatljivih za daljnju proizvodnju. Uz daljnja korigiranja parametara zavarivanja, pogotovo za uzorke sa žicom veće vlačne čvrstoće, bilo bi dobro uvesti i dinamička ispitivanja. Na taj način dobili bi realniji uvid u ponašanje proizvoda u daljnjoj eksploataciji te detaljniju razliku između primjenivanih parametara.

S parametrima novih uzoraka (test 1, test 3, test 4, test 6) moguće je povećati proizvodnost za 4,8 % – 6,8 % na dnevnoj bazi, odnosno moguće je dnevno proizvesti 10 do 14 sklopova cijev-žice više (jedan sklop cijev-žice sastoji se od jedne cijevi i 180 žica). Da bi se proizvodnost dodatno povećala, potrebno je istražiti mogućnost skraćivanja vremena manipulacije proizvodom pošto vrijeme manipulacije ima puno veći utjecaj na proizvodnost nego vrijeme zavarivanja. Dakle, za daljnje istraživanje teme zavarivanja emisionih elektroda, uz dodatna korigiranja parametara i dinamičko ispitivanje, nužno je uvesti i mogućnost

uvođenja, primjerice, automata za dodavanje žica ili cijevi te istražiti njegov utjecaj na kvalitetu spoja i proizvodnost.

Za dobiti kvalitetan proizvod, nije dovoljno samo pronaći optimalne parametre zavarivanja i osigurati što veću proizvodnost, već je važno poznavati i druge čimbenike koji utječu na svojstva proizvoda. Važno je detaljno poznavati svojstva metalnih komada koji se zavaruju (provjeravanje šarži, provjeravanje mehaničkih svojstava). Nužno je pravilno održavati opremu, a pogotovo elemente kojima se ostvaruje sila elektroda te stanje elektroda koje imaju veliki utjecaj na kvalitetu zavora. Uz to je potrebno konstantno provjeravati parametre te kvalitetu zavora i to različitim metodama ispitivanja i vrednovanja. Poštivanje svih tih stavki osigurat će visok nivo kvalitete proizvoda.

11. LITERATURA

- [1] Z. Kordić, Elektrootporno zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb, 1987.
- [2] <https://www.millerwelds.com/pdf/resistance.pdf>, dostupno 6.4.2015.
- [3] http://upload.ecvv.com/upload/Product/20125/China_Construction_Mesh_Welding_Machine_GWC2500528201292406PM3.jpg, dostupno 6.4.2015.
- [4] <http://www.ruukki.com/~media/files/steel-products/cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/ruukki-resistance-welding-manual.pdf>, dostupno 7.4.2015.
- [5] http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.filedownload?returl=%2fapex%2feducationalresources_fundamentals&file=01530000000jybm, dostupno 8.4.2015.
- [6] Elektrootporno zavarivanje – materijali s predavanja kolegija Postupci zavarivanja, doc.dr.sc Ivica Garašić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zavarene konstrukcije
- [7] P. S. Wei, T. H. Wu, Electrical contact resistance effect on resistance spot welding, International journal of heat and mass transfer, 55,3316–3324, 2012.
- [8] <http://www.swantec.com/resistance-welding-processes.php>, dostupno 8.4.2015.
- [9] <http://www.weldingnet.com/cross-wire.pdf>, dostupno 8.4.2015.
- [10] <http://www.amadamiyachi.com/glossary/glossprojectionwelding>, dostupno 9.4.2015.
- [11] http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=butt_welding.png, dostupno 11.4.2015.
- [12] <https://www.entroncontrols.com/images/downloads/700081c.pdf>, dostupno 13.4.2015.
- [13] <http://tinyurl.com/pkh5uxd>, ISF – Resistance welding guide, dostupno 14.4.2015
- [14] S. Kralj, M. Gordić, Š. Andrić, Značajke elektrootpornog zavarivanja istosmjernom strujom, zbornik radova – Oprema za zavarivanje i srodne tehnologije te njena primjena, Pula, 1995.
- [15] S.C.A. Alfaro, J.E. Vargas, M.A. Wolff, L.O. Vilarinho, Comparison between AC and MF-DC resistance spot welding by using high speed filming, Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, volume 24, 2007.
- [16] H. Zhang, J. Senkara, Resistance welding – Fundamentals and applications, CRC Press, drugo izdanje, 2012.
- [17] <http://www.livco.com/UMchapter1.pdf>, dostupno 15.4.2015.
- [18] <http://www.swantec.com/HuysArticle01.pdf>, dostupno 16.4.2015.

- [19] osobna arhiva fotografija
- [20] https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1990_02_s45.pdf, dostupno 16.4.2015.
- [21] HRN EN ISO 5182:2008, Elektrootporno zavarivanje – Materijali za elektrode i pomoćnu opremu
- [22] M. J. Peet, H. S. Hasan, H. K. D. H. Bhadeshia, Prediction of thermal conductivity of steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 11-12, 2602-2608, 2011.
- [23] D. Steinmeir, Weld cracking in laser and resistance welding, *Microjoining solutions*, Arcadia, 2013.
- [24] J. Senkara, H. Zhang, S. J. Hu, Expulsion prediction in resistance spot welding, *Welding Journal*, 123-132, travanj 2004.
- [25] <http://www.resistanceweldsupplies.com/issues/issue-expulsion-burn-through.html>, dostupno 20.4.2015.
- [26] HRN EN ISO 15614-12:2007, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test; Part 12: Spot, seam and projection welding
- [27] <http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/p01/p01.htm>, dostupno 22.4.2015.
- [28] http://www.hamonusa.com/hamonresearchcottrell/products/esp_fundamentals, dostupno 18.4.2015.
- [29] Š. Goletić, N. Imamović, Uticaj konstrukcionih elemenata elektro-odvajaa na efikasnost izdvajanja čvrstih čestica, *Naučno-stručni skup Kvalitet 2007*, Neum, 2007.
- [30] <http://www.leecosteel.com/s235-steel-plate.html>, dostupno 18.4.2015.
- [31] vježbe iz kolegija Oblikovanje materijala deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za alatne strojeve, dostupno 19.4.2015.
- [32] HRN EN ISO 17637:2012, Nerazorna ispitivanja zavara – Vizualno ispitivanje spojeva zavarenih taljenjem
- [33] HRN EN ISO 14273:2002, Dimenzije uzoraka i postupak smičnog ispitivanja točkasto, šavno i bradavičasto elektrootporno zavarenih spojeva
- [34] ISO 14270:2000, Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds
- [35] HRN EN ISO 10447:2008, Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje zavara – Ispitivanje točkastih i bradavičastih zavara ljuštenjem i razdvajanjem
- [36] HRN EN ISO 17639:2013, Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara

[37] HRN CR 12361:1999 A.1, Razorna ispitivanja zavora metalnih materijala – priprema za makroskopsku i mikroskopsku analizu

[38] HRN EN ISO 14271:2011, Elektrootporno zavarivanje – Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu (malo opterećenje i mikrotvrdoća) elektrootporno zavarenih točkastih, bradavičastih i šavnih spojeva